



**Hugo Filipe Fonseca
Domingues**

A propagação da agitação marítima e a deriva litoral



**Hugo Filipe Fonseca
Domingues**

**A propagação da agitação marítima e a
deriva litoral**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Paulo Manuel Cruz Alves Da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim

Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Tiago André Martins de Azevedo Abreu

Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Na reta final do percurso académico, importa agradecer o contributo de todos aqueles que estiveram presentes ao longo destes anos.

Ao professor Carlos Coelho, como orientador, demonstrou dedicação e apoio, bem como uma partilha de conhecimentos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Paulo Silva, com quem se mantiveram conversas que contribuíram para enriquecer o trabalho, além da disponibilidade e apoio demonstrado como coorientador.

A todos aqueles que participaram nas campanhas de campo, que com a sua energia sempre demonstraram o seu espírito de partilha e empenhamento.

Ao professor Tiago Abreu, pela disponibilidade do equipamento, fundamental para a realização das campanhas de campo.

À Carla, pela experiência transmitida, durante as simulações do programa utilizado.

A todos os professores do departamento de engenharia civil, pelo conhecimento e motivação transmitidos.

A todos os familiares e amigos, pelo alento dado ao longo do percurso académico, em especial, aos pais e namorada.

Muito obrigado

palavras-chave

Transporte sedimentar, propagação da ondulação, modelação, Praia de Mira

resumo

A deriva litoral é a principal responsável pelo transporte de sedimentos na costa ocidental portuguesa. No entanto, na bibliografia disponível, a caracterização dos volumes de sedimentos transportados mostra-se escassa e dispersa.

O conhecimento de parâmetros como a altura de onda e o respetivo ângulo de incidência, torna-se fundamental para caracterizar o clima de agitação, que reflete a capacidade de transporte sedimentar num dado trecho costeiro.

Assim, procedeu-se à realização de campanhas de campo na Praia de Mira, onde foram utilizados sensores PT, para medição da altura de onda, OBS, na medição da concentração de sedimentos em suspensão e um ECM, para medição das velocidades de corrente. Os resultados obtidos nas campanhas tiveram como objetivo estimar as características de agitação, correntes e transporte sedimentar em suspensão durante um ciclo de maré. Estes elementos permitiram também validar e calibrar os modelos STWAVE e GENESIS, onde se verificou que a altura de onda não variou muito durante a propagação até à zona de rebentação, observando-se uma rotação das ondas, por efeito da refração, à medida que estas se aproximam da costa.

Quanto ao transporte sedimentar longitudinal, extrapolando o valor obtido em campo, que corresponde ao transporte sólido em suspensão por metro de largura, estimou-se o caudal sólido em cerca de $0.96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{m}$, no sentido Norte – Sul. Através do modelo GENESIS, nas condições registadas nos dias das campanhas de campo, o valor estimado para o transporte sedimentar longitudinal ao longo da largura ativa do perfil foi de $24.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ano}$, inferior aos valores obtidos pelas fórmulas de CERC e Kamphuis, 33.9×10^4 e $46.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ano}$, respetivamente. O trabalho desenvolvido permite apresentar um contributo na caracterização da propagação das ondas e na estimativa dos caudais sólidos em transporte. A monitorização deve continuar ao longo do tempo, para aumentar a extensão da série de dados.

keywords

Sediment transport, wave propagation, modeling, Praia de Mira

abstract

The littoral drift is primarily responsible for sediment transport in the Portuguese west coast. Knowledge of parameters such as wave height and the respective angle of incidence becomes essential to characterize the wave climate, which reflects the transport capacity at a coastal stretch. The data were obtained on Praia de Mira, where PT sensors were used to measure wave height, OBS, to measure the concentration of suspended sediment and ECM to measure the speeds of current. The results, aim to estimate the wave characteristics in surf zone, and the suspension sediment transport during a tide cycle. These elements used to validate and calibrate the STWAVE and GENESIS models. The models show that the wave height doesn't change much during propagation to the surf zone and there is a rotation of wave by refraction effect, as it approaches the shore.

As for the longitudinal sediment transport, the value corresponds to the solid transport in suspension for meter wide, estimated at about $0.96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year/m}$ in North – South direction. Through the GENESIS model, under the same conditions, the value estimated for the longitudinal sediment transport along the active profile width was $24.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$, lower than the values obtained by the formulas of CERC and Kamphuis, 33.9×10^4 and $46.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$, respectively. The work developed is a contribution for the characterization of wave propagation and in the estimation of sediment transport in Praia de Mira. The monitoring should continue throughout the course of time, to increase the extension of the data series.

Índice

Índice.....	XIII
Índice de figuras	XVII
Índice de tabelas	XXI
Lista de símbolos	XXIII
Capítulo 1 Introdução.....	3
1.1. Enquadramento e objetivos	3
1.2. Organização da dissertação	4
Capítulo 2 Caso de estudo.....	7
2.1. Introdução	7
2.2. Localização	7
2.3. Características gerais	8
2.3.1. Geologia/ Geomorfologia	8
2.3.2. Perfil transversal	8
2.3.3. Batimetria/ Orientação da linha de costa.....	10
2.3.4. Granulometria	11
2.3.5. Ventos.....	13
2.3.6. Clima de agitação local	13
2.4. Campanhas de campo	14
2.4.1. Objetivos.....	14
2.4.2. Equipamentos utilizados.....	14
2.4.3. Metodologia de montagem do material no campo	16
Capítulo 3 Agitação marítima	23
3.1. Conceitos gerais.....	23

3.1.1. Parâmetros da onda	23
3.1.2. Teorias de onda	25
3.1.3. Processos de transformação	25
3.2. Agitação marítima ao largo	29
3.3. Agitação marítima na Praia de Mira	33
3.4. Profundidade vs altura de onda na costa	36
3.4.1. Altura da onda no tempo	36
3.4.2. Altura de onda em função da altura da coluna de água	38
3.4.3. Relação H_s/h_c no tempo	39
3.4.4. Profundidade de rebentação	40
Capítulo 4 Modelação dos processos de transformação da onda	45
4.1. Modelos de propagação da onda	45
4.2. STWAVE & GENESIS	45
4.2.1. Descrição dos modelos	45
4.2.2. Condições de modelação	47
4.2.3. Evolução da onda desde o largo até à profundidade de fecho	48
4.2.4. Comparação da agitação ao largo, na profundidade de fecho e junto à costa	50
Capítulo 5 Velocidades e concentração de sedimentos	57
5.1. Velocidades longitudinais e transversais	57
5.1.1. Orientação/ Tempo de recolha de dados/ Calibração/Sentido	57
5.1.2. Processamento e análise de dados	59
5.2. Concentração de sedimentos na Praia de Mira	62
5.2.1. Calibração	62
5.2.2. Concentrações medidas no campo	65
5.2.3. Concentrações vs altura de onda vs altura da coluna de água	66

Capítulo 6 Transporte sedimentar	71
6.1. Descrição dos processos	71
6.2. Caudais sólidos medidos na 3ª campanha.....	71
6.2.1. Caudais instantâneos ao longo do tempo.....	71
6.2.2. Estimativa do transporte sedimentar na 3ª campanha	72
6.3. Transporte sólido longitudinal, através do GENESIS	79
6.4. Transporte sólido longitudinal, através de formulações empíricas	82
6.4.1. Fórmulas identificadas	82
6.4.2. Resultados obtidos na 3ª campanha	84
6.5. Volumes sedimentares em transporte na costa Noroeste de Portugal	86
Capítulo 7 Considerações finais	91
7.1. Conclusões	91
7.2. Trabalhos futuros.....	93
Bibliografia.....	97

Índice de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 – Localização da área de estudo.....	7
Figura 2.2 – Divisão do perfil da Praia de Mira, em três zonas, em função da sua hidrodinâmica. a – Zona de espraçamento; b – zona de rebentação; c – zona de empolamento.	9
Figura 2.3 – Azimute da linha de costa. 1. Esporão Norte da Praia de Mira; 2. Esporão do Poço da Cruz.....	10
Figura 2.4 – Localização esquemática dos pontos do perfil transversal da praia (P_0 , P_{25} e P_{50}) onde se procedeu à recolha das amostras de sedimentos. P_0 – Localização dos equipamentos.	11
Figura 2.5 – Diâmetro mediano das areias (d_{50}), nos pontos do perfil transversal, nas campanhas realizadas.	12
Figura 2.6 – Aparelhos utilizados para medição do nível da água e velocidades das correntes.	15
Figura 2.7 – Sensor de concentração (OBS) & <i>Acoustic doppler velocimetry</i> (ADV).....	15
Figura 2.8 – Esquema de montagem dos tripés $T_{1,1}$ e $T_{1,2}$, na primeira campanha.....	17
Figura 2.9 – Esquema de montagem dos tripés $T_{2,1}$ e $T_{2,2}$, na segunda campanha.	18
Figura 2.10 – Esquema de montagem dos tripés $T_{3,1}$ e $T_{3,2}$, na terceira campanha.	18
Figura 2.11 – Esquema de medição da posição vertical do sensor. 1. Perna do tripé; 2. Sensor; 3. Distância do sensor à areia; 4. Depressão no relevo da praia; 5. Areia; 6. Superfície da água; 7. Distância do sensor até à superfície da água (h_{PT}).	19

Capítulo 3

Figura 3.1 – Nomenclatura que caracteriza as ondas (adaptado de APRH, 2007).	23
---	----

Figura 3.2 – Propagação da onda, fenómeno de empolamento (adaptado de Imamura, 2005). 1. (<) comprimento de onda ----- (>) altura de onda; 2. Cauda da onda; 3. Frente da onda; 4. (<) profundidade ----- (>) velocidade; 5. (>) profundidade ----- (<) velocidade.....	26
Figura 3.3 – 1. Elevação do terreno; 2. Linhas batimétricas; 3. Direção da ondulação; 4. Profundidade. (adaptado de Thurman, 1997).....	27
Figura 3.4 – 1. Crista das ondas; 2. Quebra-mar; 3. Zona abrigada; 4. Zona exposta. 5. Terreno; 6. Crista das ondas incidentes; 7. Cristas das ondas refletidas.....	28
Figura 3.5 – 1. Zona de rebentação; 2. Cota de máximo espraçamento; 3. Nível médio das águas do mar; 4. Espraçamento; 5. Refluxo.....	29
Figura 3.6 – Frequência de distribuição das classes de altura de onda significativa na boia de Leixões, respeitantes às três campanhas de campo realizadas.....	30
Figura 3.7 – Frequência de distribuição dos rumos de agitação na boia de Leixões, respeitantes às três campanhas de campo realizadas.	31
Figura 3.8 – Registos ao largo (boia de Leixões) de alturas de onda significativas, ao longo dos dias das campanhas.....	32
Figura 3.9 – Profundidade dos aparelhos ao longo do tempo, para as diferentes campanhas de campo.....	33
Figura 3.10 – Ondas de curto período, altas frequências. ESLA – Elevação da superfície livre da água.	34
Figura 3.11 – Componentes de longo período associadas às marés, baixas frequências. ACA – Altura da coluna de água.....	35
Figura 3.12 – Altura de onda significativa nos PT, ao longo do tempo, para as campanhas de campo. (-) – Altura de onda significativa na costa; (ˆ) – altura de onda significativa ao largo, para a 3ª campanha.....	37
Figura 3.13 – Altura de onda significativa, H_s em função da altura da coluna de água, h_c	38

Figura 3.14 – Relação entre altura de onda significativa e a altura da coluna de água, em função do tempo, para as campanhas realizadas (média representada a tracejado).	39
--	----

Capítulo 4

Figura 4.1 – Organograma representativo dos parâmetros obtidos na modelação da onda. 46	
Figura 4.2 – Representação em 3D da grelha do modelo STWAVE.....	47
Figura 4.3 – Evolução dos rumos e alturas das ondas características, após propagação no STWAVE. A_0 – Azimute da onda propagada.	49
Figura 4.4 – Evolução das alturas de ondas propagadas perpendicularmente ao local de medição.	50
Figura 4.5 – Evolução da altura de onda do largo para a costa, obtidas por simulação numérica.	51
Figura 4.6 – Evolução da direção de onda do largo para a costa, considerando o ângulo da onda com a linha de costa.....	52

Capítulo 5

Figura 5.1 – Orientação do ECM em relação ao Norte.....	57
Figura 5.2 – Esquema que caracteriza o do ângulo θ_{xy} entre o eixo Y e V_{xy}	58
Figura 5.3 – Definição das componentes da velocidade (V_x e V_y).....	59
Figura 5.4 – Velocidades (V_x e V_y) entre as 13:30h até às 19:00h do dia 28 de Fevereiro de 2012.....	59
Figura 5.5 – Dispersão de valores da velocidade transversal e longitudinal (a linha de tendência tem um desvio com a horizontal de cerca de 4°).....	60
Figura 5.6 – Média a cada 10 minutos, das componentes da velocidade (V_x e V_y) vs profundidade.....	61
Figura 5.7 – Misturadora e sedimentos, durante o processo de calibração dos OBS.	63
Figura 5.8 – Calibração dos OBS usados durante a 3ª campanha de campo.	64

Figura 5.9 – Concentrações de sedimentos em suspensão ao longo do período de medições, na 3ª campanha.65

Figura 5.10 – Altura significativa das ondas (H_s) e concentrações (C) ao longo do tempo. ...66

Figura 5.11 – Altura da coluna de água (H_c) e concentrações (C) ao longo do tempo.67

Capítulo 6

Figura 6.1 – Média a cada 10 minutos, do caudal instantâneo em função da profundidade ao longo do período de aquisição de dados do ECM_{3,1}.72

Figura 6.2 – Caudal sólido longitudinal (Q_l).73

Figura 6.3 – Caudal sólido transversal (Q_t).74

Figura 6.4 – Alturas de influência dos OBS. 1. Nível da superfície da água; 2. Nível da areia.75

Figura 6.5 – Caudal sólido longitudinal (Q_l), consoante as diferentes alturas de influência dos OBS.76

Figura 6.6 – Caudal sólido transversal (Q_t), consoante as diferentes alturas de influência dos OBS.78

Índice de tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Datas de realização das campanhas de campo na Praia de Mira.	7
Tabela 2.2 – Frequência de amostragem dos sensores.....	16
Tabela 2.3 – Tabela das marés para as 3 campanhas (IH, 2012).....	16
Tabela 2.4 – Nome do sensor e distâncias iniciais e finais do sensor à areia.....	20

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Período e número de registos considerados para cada campanha.	29
---	----

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Características iniciais das ondas no STWAVE.....	48
--	----

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Tratamento estatístico das componentes da velocidade V_x e V_y	61
---	----

Capítulo 6

Tabela 6.1 – Altura de influência de cada OBS, ao longo do tempo (t).	75
Tabela 6.2 – Caudal sólido longitudinal, Q_l	77
Tabela 6.3 – Caudal longitudinal obtido após modelação no GENESIS.....	82
Tabela 6.4 – Estimativa do transporte sólido longitudinal, através da fórmula de CERC...85	
Tabela 6.5 – Estimativa do transporte sólido longitudinal, através da fórmula de Kamphuis.	85
Tabela 6.6 – Caudal sólido longitudinal	87

Lista de símbolos

A_0	Ângulo da onda com o Norte;
C_g	Velocidade de grupo de ondas dada pela teoria linear das ondas (m/s);
F	Quantidade de sedimentos em suspensão;
H	Altura de onda;
$H_{3.1}$	Altura de influência do OBS _{3.1} ;
$H_{3.2}$	Altura de influência do OBS _{3.2} ;
$H_{3.3}$	Altura de influência do OBS _{3.3} ;
H_b	Altura de onda na rebentação;
H_{DOC}	Altura de onda na profundidade de fecho;
H_s	Altura de onda significativa;
H_{s0}	Altura de onda significativa ao largo;
K	Coefficiente empírico;
K_1	Coefficiente empírico usado na calibração do modelo GENESIS;
K_2	Coefficiente empírico usado na calibração do modelo GENESIS;
L	Comprimento de onda;
L_0	Comprimento de onda ao largo;
$Q_{i(x-x)}$	Caudal instantâneo longitudinal;
$Q_{i(y-y)}$	Caudal instantâneo transversal;
Q_l	Caudal sólido longitudinal em suspensão, por metro de largura;
Q_s	Volume potencial de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa em determinada unidade de tempo;
Q_t	Caudal sólido transversal em suspensão, por metro de largura;
T	Período de onda;

T_0	Período de onda ao largo;
T_{DOC}	Período de onda na profundidade de fecho;
T_p	Período de pico;
V	Velocidade média da corrente longitudinal que atua na zona de rebentação;
V_x	Componente da velocidade longitudinal calibrada;
V_y	Componente da velocidade transversal calibrada;
W_s	Velocidade de queda dos sedimentos;
c	Celeridade da onda;
$c_{3.1}$	Concentração medida pelo OBS _{3.1} ;
$c_{3.2}$	Concentração medida pelo OBS _{3.2} ;
$c_{3.3}$	Concentração medida pelo OBS _{3.3} ;
d_{50}	Diâmetro mediano das areias;
g	Aceleração da gravidade ($9.81 \text{ m}^2/\text{s}$);
h	Profundidade;
h_b	Profundidade de rebentação das ondas;
h_c	Média da altura da coluna de água, em cada 10 minutos;
h_{PT}	Distância do sensor até à superfície da água;
k	Número de onda;
k_b	Índice de rebentação;
m	Declive da praia;
n	Porosidade dos sedimentos (0.4);
$s_{3.1}$	Sinal debitado pelo OBS _{3.1} (mV);
$s_{3.2}$	Sinal debitado pelo OBS _{3.2} (mV);

$s_{3.3}$	Sinal debitado pelo OBS _{3.3} (mV);
w	Frequência de onda;
α	Ângulo da ortogonal com a perpendicular à batimétrica;
α_0	Ângulo da ortogonal com a perpendicular à batimétrica, ao largo;
α_b	Ângulo da ortogonal com a perpendicular à batimétrica, na rebentação;
α_{DOC}	Ângulo da ortogonal com a perpendicular à batimétrica, na profundidade de fecho;
α_i	Ângulo de incidência da onda;
α_r	Ângulo de reflexão da onda;
β	Constante de calibração do ECM (0.1);
ρ	Massa volúmica de água (1027 kg/m ³);
ρ_s	Massa volúmica do sedimento (2650 kg/m ³);
σ^2	Variância da elevação da superfície livre.

Capítulo 1

Introdução

Capítulo 1 Introdução

1.1. Enquadramento e objetivos

Desde o tempo dos descobrimentos que o mar é fundamental para Portugal, traduzindo-se ao longo dos tempos numa fonte infindável de recursos. Esta dissertação representa um contributo para o estudo da propagação das ondas desde que se formam, ao largo, até chegarem à costa, onde se dá a rebentação, bem como para avaliação das correntes longitudinais, responsáveis pelo transporte sedimentar na zona costeira de Aveiro.

A caracterização de variáveis como a altura, período e direção de propagação da onda são a base deste projeto, pois contribuem para delinear a agitação marítima local, que se traduz como sendo a ação principal no que respeita ao transporte de sedimentos nos trechos costeiros (Coelho, 2005). Por outro lado, estes parâmetros tornam-se fundamentais na calibração de modelos numéricos, através da comparação dos dados obtidos em campanhas de campo e das soluções numéricas.

Estabelecem-se assim como objetivos principais desta dissertação, numa primeira fase, a análise e discussão dos resultados obtidos no decorrer das campanhas de campo, realizadas na Praia de Mira durante os meses de Outubro, Janeiro e Fevereiro, referentes ao clima de agitação observado e à avaliação do caudal sólido transportado paralelamente à costa. Estes dois temas dependem um do outro, uma vez que, logo após se dar a rebentação, colocando em suspensão os sedimentos, a corrente longitudinal induzida pela ondulação, transporta partículas tanto em suspensão turbulenta como por arrastamento de fundo (Araújo e Alfredini, 2001).

Numa segunda fase, pretendeu-se avaliar a propagação de ondas através do modelo STWAVE, de forma a simular o percurso das ondas desde que se formam até à profundidade de fecho. Aí foi utilizado o modelo GENESIS que permitirá, de uma forma aproximada, simular a propagação das ondas desde a profundidade de fecho até ao ponto onde se efetuaram as medições no campo, tanto das ondas, como das correntes longitudinais, o que possibilitará aferir os resultados numéricos.

1.2. Organização da dissertação

De forma geral, esta dissertação está organizada em 7 capítulos distintos, sendo o primeiro a introdução, onde para além da organização da dissertação é apresentado um breve enquadramento do trabalho aqui descrito.

No 2º capítulo começa-se por descrever o caso de estudo, características do local, equipamentos utilizados e objetivos iniciais.

O 3º capítulo está dividido em 4 subcapítulos. O primeiro pretende explicar conceitos relacionados com as ondas e todos os processos envolvidos na sua formação e propagação. No segundo e terceiro subcapítulos, apresentam-se os registos da ondulação ao largo e na costa para os dias das campanhas de campo. No último ponto deste capítulo relaciona-se a altura da coluna água com altura de onda na costa.

O 4º capítulo começa com uma breve descrição dos modelos usados para modelação dos processos de transformação da onda, sendo o STWAVE e o GENESIS os mais focados. Este capítulo termina com a apresentação e análise da propagação das ondas, após simulação do clima de agitação registado ao largo aquando realização das campanhas de campo, de forma a comparar os resultados finais com os dados recolhidos em campo.

O 5º capítulo, desta dissertação, está dividido em 2 subcapítulos, onde se faz uma análise às velocidades e concentração de sedimentos presentes durante a aquisição de dados nas campanhas de campo.

Os caudais sólidos transportados, capítulo 6, permitiram chegar a uma estimativa do caudal sólido registado no decorrer das campanhas de campo, através do recurso a diferentes equipamentos, nomeadamente um ECM e um número variável, consoante as campanhas, de OBS, que medem a velocidade do escoamento e a concentração de sedimentos em suspensão, respetivamente. Este capítulo engloba ainda uma estimativa do caudal sólido transportado recorrendo a fórmulas empíricas, como também através da modelação com recurso ao modelo GENESIS.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões das diferentes análises realizadas durante este trabalho. São também apresentados desenvolvimentos futuros que visam incentivar a realização de estudos nesta área.

Capítulo 2

Caso de estudo

Capítulo 2 Caso de estudo

2.1. Introdução

Esta dissertação baseia-se em diversas análises aos dados recolhidos em três campanhas de campo realizadas na zona de Mira, entre Outubro de 2012 e Março de 2013, sendo que a primeira contemplou dois ciclos de maré e as restantes apenas um. As datas correspondentes ao início e fim de cada campanha são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Datas de realização das campanhas de campo na Praia de Mira.

Campanhas	Início	Fim
1ª Campanha (2 ciclos de maré)	Dia 16-10-2012 às 08:00h	Dia 17-10-2012 às 13:00h
2ª Campanha (1 ciclo de maré)	Dia 14-01-2013 às 09:00h	Dia 14-01-2013 às 22:30h
3ª Campanha (1 ciclo de maré)	Dia 28-02-2013 às 09:00h	Dia 01-03-2013 às 01:00h

2.2. Localização

O trecho onde foram realizadas as campanhas de campo está localizado entre o Poço da Cruz e a Praia de Mira, na costa Noroeste de Portugal. Na Figura 2.1 estão representadas as distâncias aproximadas entre o perfil da praia onde se procedeu à instalação dos equipamentos e os pontos de referência mais próximos, incluindo-se também uma imagem do local de estudo.

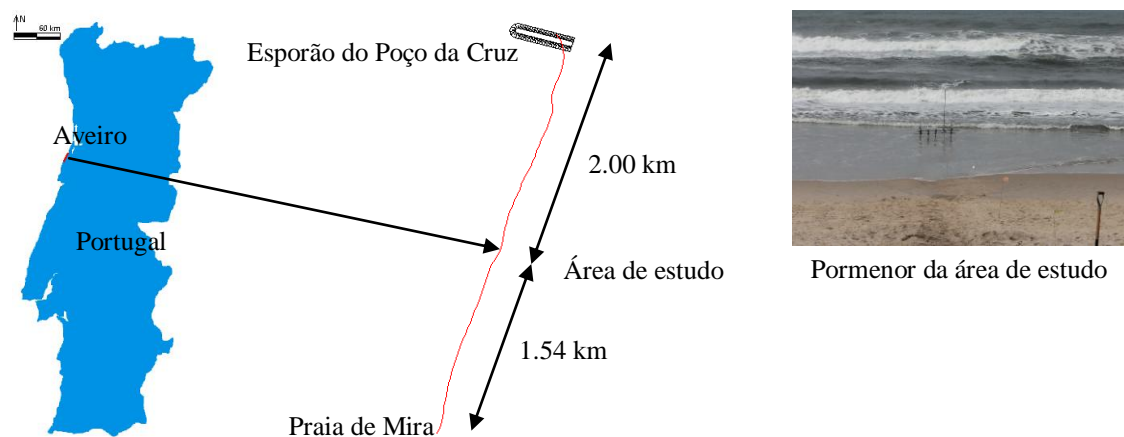


Figura 2.1 – Localização da área de estudo.

2.3. Características gerais

2.3.1. Geologia/ Geomorfologia

De uma forma geral, a área de estudo integra-se na Orla Mesocenozóica Ocidental, correspondendo a uma bacia de sedimentação instalada no bordo ocidental do Maciço Hespérico. A orla é constituída por rochas sedimentares mesocenozóicas, com grande número de fraturas e dobras amplas de orientação Norte-Sul. O trecho em estudo designa-se geomorfologicamente como sendo uma planície costeira de grande uniformidade topográfica, devendo-se ao facto de esta zona ser aplanada e de baixa altitude (Dias *et al.*, 1994).

As estruturas de defesa costeira existentes a Norte do sector analisado, induzem alterações no comportamento morfodinâmico. A largura das praias é assim influenciada, tendendo a aumentar em direcção a Sul, no sentido da Praia de Mira, resultado da acumulação de sedimentos a barlamar dos esporões aí existentes.

Outro aspeto que se pode constatar, tanto no local, como nas várias referências bibliográficas que caracterizam a área de estudo, é o facto da faixa costeira ser formada por extensos corpos dunares, sendo interrompidos somente por intervenções humanas (Dias *et al.*, 1994).

A costa arenosa que caracteriza a zona de estudo estende-se até à praia submersa, onde o pendor médio relativamente pequeno e os sistemas barra-fossa apresentam-se fragilizados ou com dimensões reduzidas (ARH, 2012).

2.3.2. Perfil transversal

O perfil transversal de uma praia é um sistema variável no tempo e no espaço pelo que a tentativa de delimitar as zonas integrantes deste ambiente deve ter em consideração os processos hidrodinâmicos dominantes no local. Com base nas tipologias sugeridas tanto por Komar (1976) como, mais recentemente por Short (1999), a divisão da zona de estudo, da costa para o largo, considerada na Figura 2.2 foi a seguinte:

a. Zona de espraimento

Segundo Masselink e Puleo (2006) a zona de espraimento define-se como sendo o espaço coberto pelo espraio e refluxo da onda alternadamente. Caracterizada por correntes fortes e instáveis, níveis de turbulência elevados e por taxas de transporte sedimentar elevadas, esta região é considerada a mais dinâmica da costa, verificando-se aí rápidas mudanças morfológicas do perfil (Puleo *et al.*, 2000);

b. Zona de rebentação

Zona que se estende entre as zonas de espraimento e empolamento, onde as correntes longitudinais e transversais desempenham um papel importante na sua dinâmica (Veeramondy e Svendsen, 2000). Na Figura 2.2 pode-se observar que a rebentação ocorre em dois sítios diferentes do perfil, definindo-se duas zonas de rebentação;

c. Zona de empolamento

Local onde a ondulação começa a interagir com o fundo, modificando as suas características. Nesta zona dá-se um crescimento da altura de onda, face a uma diminuição do seu comprimento, conduzindo esta à rebentação. Tanto o conceito de empolamento como de rebentação são descritos posteriormente com algum detalhe.



Figura 2.2 – Divisão do perfil da Praia de Mira, em três zonas, em função da sua hidrodinâmica. a – Zona de espraimento; b – zona de rebentação; c – zona de empolamento.

2.3.3. Batimetria/ Orientação da linha de costa

No desenvolvimento desta dissertação estabelece-se como objetivo a validação de um modelo numérico. Assim a batimetria do local torna-se uma informação básica para um correto funcionamento do modelo de simulação de propagação de ondas.

No âmbito do Projeto Adaptaria (Adaptaria, 2013) foram recolhidos dados batimétricos de duas cartas da série de pescas do Instituto Hidrográfico, a nº 24201 (Caminha – Aveiro), editada em Outubro de 1999, e a nº 24202 (Aveiro – Peniche), editada em Outubro de 2000. Estas cartas estão representadas à escala 1:50000 e utilizam o sistema de coordenadas *Datum* Europeu de 1950. A conjugação da informação batimétrica e cartográfica, recolhida pelo estudo referido, nomeadamente as cartas nº 195 e nº 206, à escala 1:25000, do Instituto Geográfico do Exército, representadas segundo a projeção de Gauss, elipsoide internacional, *Datum* de Lisboa, permitiu definir o domínio espacial de modelação, para o modelo numérico.

No que concerne à orientação da linha de costa, recorreu-se ao *Google Earth*, estabelecendo um intervalo delimitado a Norte pelo esporão do Poço da Cruz e a Sul pelo esporão Norte da Praia de Mira (Figura 2.3). O azimute obtido foi de 14°, o que vai de encontro ao que é referido na bibliografia mais recente (Adaptaria, 2013), para este trecho costeiro.



Figura 2.3 – Azimute da linha de costa. 1. Esporão Norte da Praia de Mira; 2. Esporão do Poço da Cruz.

2.3.4. Granulometria

As dimensões dos sedimentos distribuídos ao longo do perfil transversal de uma praia interferem invariavelmente nas dinâmicas dessa mesma praia, refletindo a topografia dos fundos, a turbulência e dissipação de energia de cada local e influenciando o transporte sedimentar e a propagação da onda num determinado trecho costeiro (Fonseca, 2011). Como é referido por King e Galvin (2002), a dimensão dos grãos de areia da praia varia no tempo e no espaço; no inverno a dimensão dos sedimentos na praia é tipicamente superior à observada no verão. Coelho (2005) refere que, habitualmente a variabilidade da dimensão dos grãos é também maior na parte da praia deixada a descoberto na maré baixa do que na praia emersa. Por estes motivos, no decorrer das campanhas de campo foram recolhidas três amostras de sedimentos ao longo do perfil transversal da praia, com espaçamento de 25 metros conforme se ilustra no esquema da Figura 2.4, tendo em conta que a localização dos equipamentos foi variável de campanha para campanha, sendo representada na figura pelo ponto P_0 . Feita a recolha, procedeu-se à respetiva análise granulométrica, que consistiu na determinação das dimensões das partículas das amostras e no tratamento estatístico dessa informação.

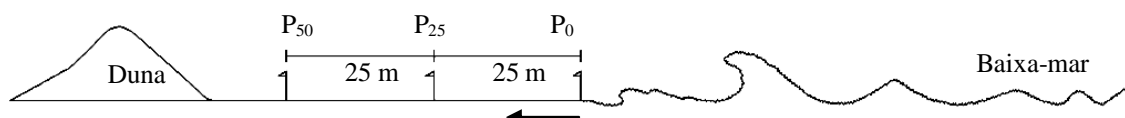


Figura 2.4 – Localização esquemática dos pontos do perfil transversal da praia (P_0 , P_{25} e P_{50}) onde se procedeu à recolha das amostras de sedimentos. P_0 – Localização dos equipamentos.

Após a respetiva análise granulométrica, foi determinado o diâmetro mediano (d_{50}) para cada amostra recolhida. Na Figura 2.5, apresenta-se, para as diferentes campanhas, os valores do diâmetro mediano das areias, por ponto de recolha no perfil transversal.

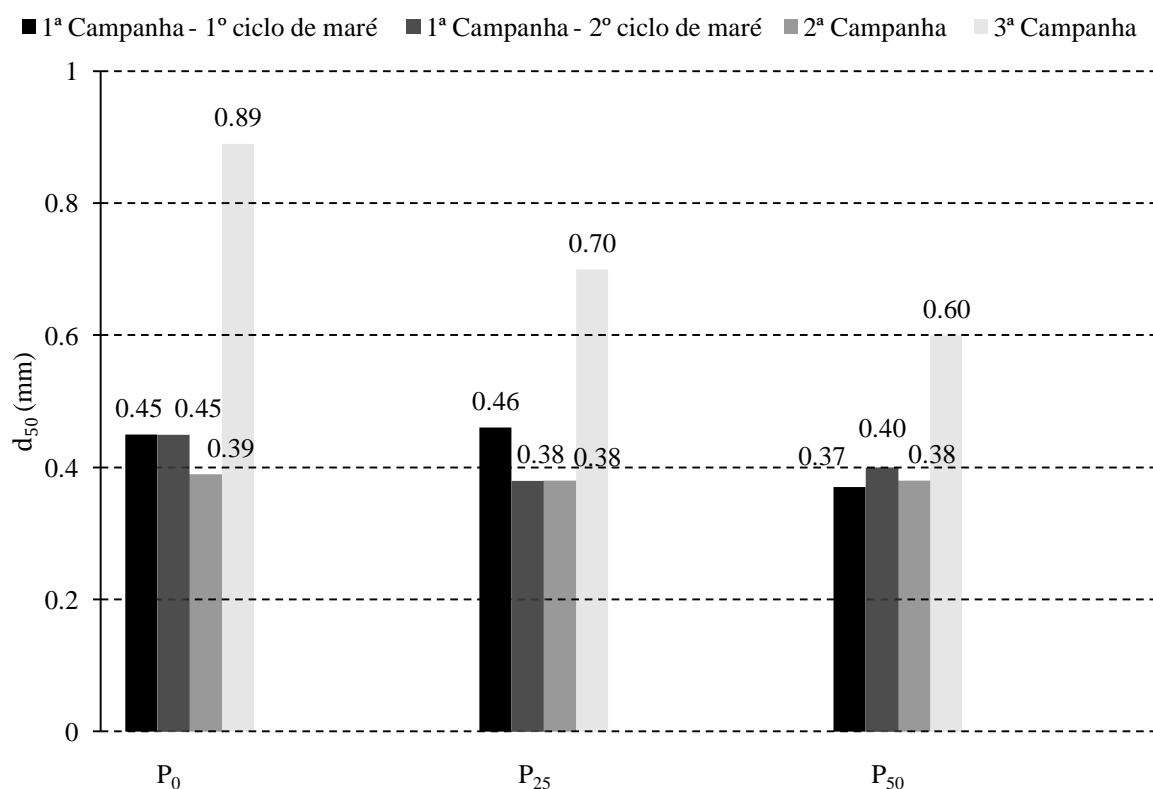


Figura 2.5 – Diâmetro mediano das areias (d_{50}), nos pontos do perfil transversal, nas campanhas realizadas.

Da análise do gráfico conclui-se, que o tamanho dos sedimentos, para as duas primeiras campanhas, não variam significativamente ao longo do perfil transversal da praia, nem nos diferentes dias de realização das campanhas, assumindo valores entre 0.37 e 0.46 milímetros. A 3ª campanha, para além de apresentar sedimentos de maior dimensão que as restantes campanhas, também registou um decréscimo significativo do tamanho dos sedimentos, à medida que a distância à duna diminuía. A maior dimensão dos sedimentos, na 3ª campanha, surge como resultado de um clima de agitação muito energético que se registou nos dias anteriores à realização da campanha.

Segundo Komar (1976) a maior dimensão dos sedimentos está localizada na zona de rebentação das ondas, o que leva a crer que, durante a preia-mar, a localização desta zona foi próxima do ponto P₀.

2.3.5. Ventos

Segundo Coelho (2005), o vento é um elemento fundamental tanto na modelação do perfil transversal de um dado trecho costeiro, como na caracterização do clima de agitação. Assim, o regime de ventos interfere não só na constituição das dunas costeiras como na formação de ondas na superfície do mar, geradas ao largo ou localmente.

De acordo com os estudos realizados por Coelho (2005), baseados numa série de registos de ventos ao largo da costa de Aveiro, desde Janeiro de 1980 a Agosto de 2002, o regime de ventos é caracterizado por ventos dominantes dos rumos dos quadrantes N e NW, embora se realce a dificuldade em estabelecer um regime típico para a costa Noroeste de Portugal ao longo dos anos.

2.3.6. Clima de agitação local

O estudo do clima de agitação visa reconhecer a importância das características das ondas e a compreensão dos fenómenos de propagação da onda desde o largo até à rebentação. A aquisição de dados de agitação marítima através de boias ondógrafo, com vista à caracterização do clima na costa portuguesa, tem sido uma atividade constante nos últimos anos.

Segundo Coelho (2005), para ondas ao largo da costa Oeste portuguesa, as alturas de ondas significativas são em média de 2 a 2.5 metros, com períodos que variam de 9 a 11 segundos, sendo que este último parâmetro tem tendência para diminuir nos meses de Junho, Julho e Agosto, correspondendo aos meses com menor alturas de onda, como é referido por Ferreira (1993). Coelho (2005) refere ainda que as ondas geradas por ventos de altas latitudes do Atlântico Norte provêm na sua maioria dos quadrantes WNW e NNW.

Numa descrição mais detalhada, Carvalho e Barceló (1966) traduzem em percentagem de ocorrências a agitação na costa ocidental portuguesa, atribuindo 45% a alturas significativas de onda entre 1 m e 2 m, 15% a valores superiores a 3 m, e apenas 2% para alturas superiores a 6 m. Os mesmos autores, com base numa série de valores máximos mensais, referem uma variabilidade acentuada destes números, verificando-se registos de alturas significativas de onda com 11 m em Dezembro e Janeiro, e de 4 m em Julho.

2.4. Campanhas de campo

2.4.1. Objetivos

Numa primeira fase e no âmbito de uma equipa alargada que integrou os trabalhos de campo, propuseram-se como objetivos para a realização das campanhas, os seguintes pontos:

- Medição da elevação da superfície livre de água do mar, da velocidade do escoamento e da concentração de sedimentos em suspensão na zona de rebentação e espraçamento da onda.
- Medição das variações morfológicas (transversais e longitudinais) da praia;
- Medição do transporte sedimentar na zona de espraçamento com recurso a areia marcada.

É de referir que os dois últimos pontos não foram alvo de descrição neste documento, podendo ser eventualmente referenciados para justificar resultados suportados pelas medições mencionadas.

2.4.2. Equipamentos utilizados

Para alcançar os objetivos propostos, foram utilizados os seguintes equipamentos:

Sensor de pressão (PT)

O aparelho ilustrado na Figura 2.6a permite conhecer a altura das ondas através da avaliação do nível da superfície de água (Alberti, 2010), sendo que funciona como um transdutor que converte a pressão num sinal analógico elétrico (Lourenço, 2012). O equipamento referenciado é passível de margem de erro de medição até 0.1%, o que torna os resultados obtidos fiáveis (Inc., 2010).

Correntómetro eletromagnético (ECM)

Este equipamento (Figura 2.6b) é utilizado para determinação da direção e magnitude da velocidade das correntes oceânicas (Dimar, 2008).



a) Sensor de pressão (PT).



b) Correntómetro eletromagnético (ECM).

Figura 2.6 – Aparelhos utilizados para medição do nível da água e velocidades das correntes.

Sensor de concentração (OBS)

A função deste equipamento (Figura 2.7) é medir a concentração de sedimentos em suspensão e também a turvação, em meio líquido (Sousa, 2009). A resposta de alta frequência destes aparelhos permite uma excelente resolução temporal da concentração de sedimentos em suspensão, em condições de fluxo altamente variável, encontrados em ambiente costeiro (Sutherland *et al.*, 1999).

Acoustic doppler velocimetry (ADV)

Este tipo de equipamento é projetado para medir as componentes da velocidade instantânea num único ponto, com uma frequência relativamente alta (Figura 2.7).

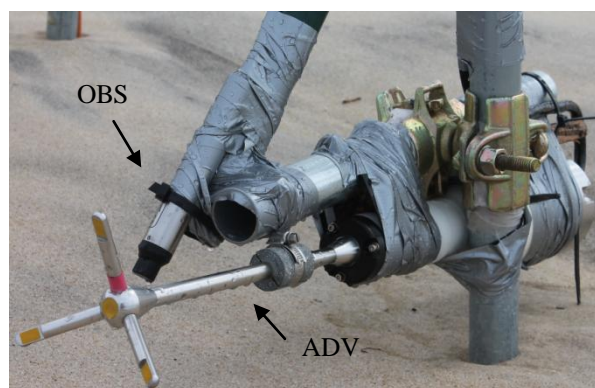


Figura 2.7 – Sensor de concentração (OBS) & Acoustic doppler velocimetry (ADV).

Na Tabela 2.2, são apresentadas as frequências de amostragem referentes a cada instrumento.

Tabela 2.2 – Frequência de amostragem dos sensores.

Instrumento	Frequência (Hz)
Sensor de pressão (PT)	2.00
Correntómetro eletromagnético (ECM)	10.00
Sensor de concentração (OBS)	6.66(6)
<i>Acoustic doppler velocimetry</i> (ADV)	10.00

2.4.3. Metodologia de montagem do material no campo

A calendarização das atividades das campanhas foi realizada em função das previsões de maré do Instituto Hidrográfico. Na Tabela 2.3 apresenta-se o horário das marés durante as campanhas e os níveis de superfície livre esperados (altura referida ao zero hidrográfico).

Tabela 2.3 – Tabela das marés para as 3 campanhas (IH, 2012).

Campanhas	Data	Hora	Altura (m)	Maré
1ª Campanha	2012-10-16	09:56h	0.39	Baixa-Mar
	2012-10-16	16:31h	3.54	Preia-Mar
	2012-10-16	22:18h	0.41	Baixa-Mar
	2012-10-17	04:51h	3.53	Preia-Mar
	2012-10-17	10:39h	0.37	Baixa-Mar
2ª Campanha	2013-01-14	10:36h	0.44	Baixa-Mar
	2013-01-14	17:08h	3.33	Preia-Mar
	2013-01-14	22:49h	0.59	Baixa-Mar
3ª Campanha	2013-02-28	10:24h	0.55	Baixa-Mar
	2013-02-28	16:55h	3.32	Preia-Mar
	2013-02-28	22:38h	0.58	Baixa-Mar

A primeira campanha iniciou-se com a instalação de uma estrutura em forma de tripé ($T_{1.1}$), no qual foram colocados dois OBS ($OBS_{1.1}$ e $OBS_{1.3}$), um ECM (ECM_1) e um PT ($PT_{1.1}$). O levantamento topográfico, através de um Sistema Integrado de Elevada Resolução Espacial para Monitorização de Praias, *Inshore* (Baptista *et al.*, 2011), decorreu em simultâneo com os trabalhos de montagem. Colocou-se o ECM_1 invertido, com o sensor o mais próximo da areia, verificando a sua verticalidade, e colocaram-se os diferentes equipamentos nas posições retratadas pela Figura 2.8a.

Montado o primeiro tripé, iniciou-se a montagem do segundo tripé ($T_{1.2}$), que se encontrava ligado através de dois cabos, pertencentes aos OBS, ao $T_{1.1}$. Este tripé ficou alinhado com o primeiro, mas afastado cerca de 35 metros para o interior, localizando-se na zona de espraçamento, durante a preia-mar. No segundo tripé foram colocados um PT ($PT_{1.2}$), um OBS ($OBS_{1.2}$) e um ADV (Figura 2.8b). Seguidamente procedeu-se à ligação do $T_{1.2}$ a um gerador, para assegurar o fornecimento de energia elétrica. O $T_{1.2}$ possuía um segundo nível (mais elevado), que serviu de base para o módulo de processamento do ADV e OBS, bem como para apoio de um computador portátil.

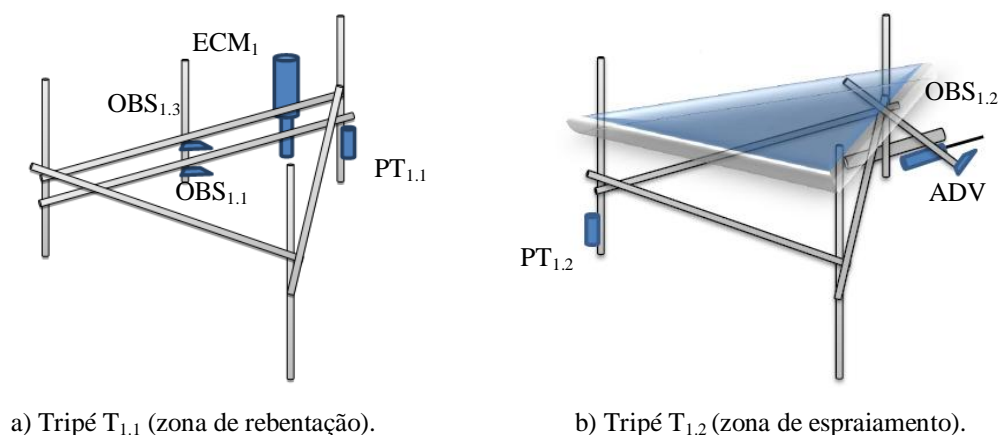
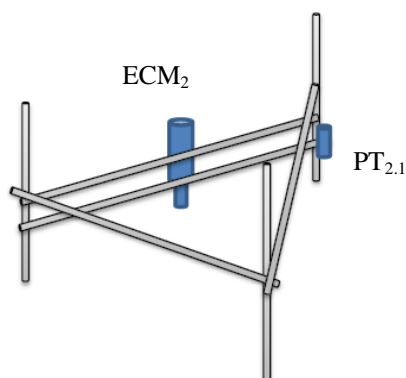


Figura 2.8 – Esquema de montagem dos tripés $T_{1.1}$ e $T_{1.2}$, na primeira campanha.

Na segunda campanha (Figura 2.9) foram colocadas igualmente duas estruturas, afastadas de 75 metros, uma localizada na zona de rebentação e outra, mais simples, na zona de espraçamento. Na zona de rebentação foram colocados um ECM (ECM_2) e um PT ($PT_{2.1}$), enquanto na zona de espraçamento foi colocado apenas um PT ($PT_{2.2}$).



a) Tripé T_{2.1} (zona de rebentação).

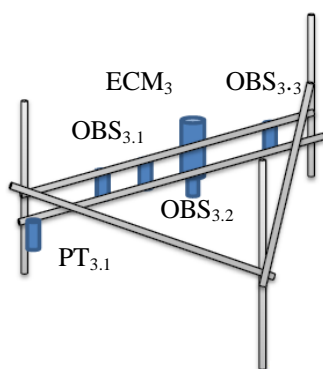


b) Tripé T_{2.2} (zona de espraiamento).

Figura 2.9 – Esquema de montagem dos tripés T_{2.1} e T_{2.2}, na segunda campanha.

No que respeita à terceira campanha, para além de um ECM (ECM₃) e um PT (PT_{3.1}), instalaram-se ainda na estrutura localizada na zona de rebentação três OBS (OBS_{3.1}, OBS_{3.2} e OBS_{3.3}), com o objetivo de medir a concentração de sedimentos em suspensão.

Na estrutura localizada fora da zona de rebentação colocou-se um PT (PT_{3.2}), como é ilustrado na Figura 2.10.



a) Tripé T_{3.1} (zona de rebentação).



b) Tripé T_{3.2} (zona de espraiamento).

Figura 2.10 – Esquema de montagem dos tripés T_{3.1} e T_{3.2}, na terceira campanha.

A Tabela 2.4 apresenta o posicionamento dos equipamentos, no início e no fim das campanhas. As alturas representadas dizem respeito à distância a que os aparelhos se encontravam em relação à superfície de areia, permitindo avaliar o impacto da dinâmica do perfil. A Figura 2.11 ilustra esquematicamente os níveis de referência utilizados nessas medições. Como referido, a 1ª campanha decorreu durante dois ciclos de maré, o primeiro teve início às 09:56h do dia 16-10-2012 e terminou às 22:18h do mesmo dia, enquanto o segundo ciclo prolongou-se desde a hora de encerramento do primeiro até às 10:39h do dia seguinte (Tabela 2.1). Em alguns casos, as distâncias dos aparelhos no fim do primeiro ciclo não coincidem com as distâncias iniciais do segundo ciclo, porque os aparelhos (PT e OBS_{1,2}) foram trocados de posição na passagem do primeiro para o segundo ciclo de maré. As restantes campanhas realizaram-se apenas para um ciclo de maré, sendo apresentadas as medições aquando a instalação dos equipamentos e no momento em que estes foram retirados.

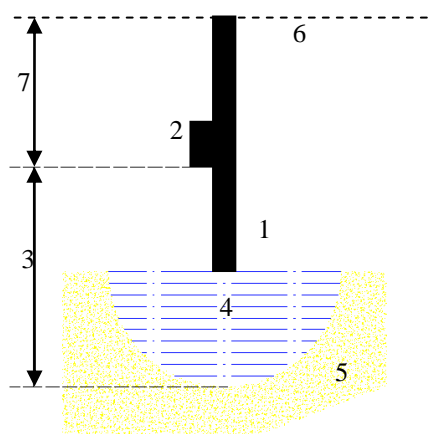


Figura 2.11 – Esquema de medição da posição vertical do sensor. 1. Perna do tripé; 2. Sensor; 3. Distância do sensor à areia; 4. Depressão no relevo da praia; 5. Areia; 6. Superfície da água; 7. Distância do sensor até à superfície da água (h_{PT}).

Tabela 2.4 – Nome do sensor e distâncias iniciais e finais do sensor à areia.

Campanhas	1º Ciclo de maré			2º Ciclo de maré		
	Sensor	Dist. inicial (cm)	Dist. final (cm)	Sensor	Dist. inicial (cm)	Dist. final (cm)
1ª Campanha	PT _{1,1}	10.0	26.0	PT _{1,1}	10.0	2.0
	PT _{1,2}	12.0	16.5	PT _{1,2}	5.0	16.5
	ECM ₁	15.0	35.5	ECM ₁	35.5	9.0
	OBS _{1,1}	15.5	30.0	OBS _{1,1}	30.0	10.0
	OBS _{1,2}	12.0	16.5	OBS _{1,2}	5.0	15.0
	OBS _{1,3}	25.5	42.0	OBS _{1,3}	42.0	21.0
	ADV	12.0	16.5	ADV	17.0	17.0
2ª Campanha	PT _{2,1}	15.0	-	-	-	-
	PT _{2,2}	15.0	19.0	-	-	-
	ECM ₂	12.0	-	-	-	-
3ª Campanha	PT _{3,1}	10.0	15.0	-	-	-
	PT _{3,2}	10.0	-	-	-	-
	ECM ₃	18.0	23.0	-	-	-
	OBS _{3,1}	26.0	29.0	-	-	-
	OBS _{3,2}	10.0	13.5	-	-	-
	OBS _{3,3}	18.0	23.0	-	-	-

Nota: Os espaços assinalados com (-) significam a inexistência de dados.

Capítulo 3

Agitação marítima

Capítulo 3 Agitação marítima

3.1. Conceitos gerais

Este capítulo inicia-se com a apresentação de características das ondas marítimas. As ondas que se propagam na interface oceano – atmosfera, devido à influência do campo gravitacional, são denominadas de ondas gravíticas. Um exemplo deste tipo de ondas são as ondas marítimas, que possuem uma componente oscilatória transversal, na direção do campo gravitacional, e uma componente longitudinal, na direção da propagação, determinando que uma partícula do meio descreva uma elipse, ou em caso particular, uma circunferência enquanto a onda passa por ela (Silveira e Varriale, 2005).

As ondas podem interagir com o fundo móvel de areia, agitando os sedimentos que ali se encontram, e são responsáveis pela origem de correntes que transportam esses mesmos sedimentos, como por exemplo a deriva litoral.

3.1.1. Parâmetros da onda

A Figura 3.1 apresenta os parâmetros mais importantes que caracterizam uma onda.

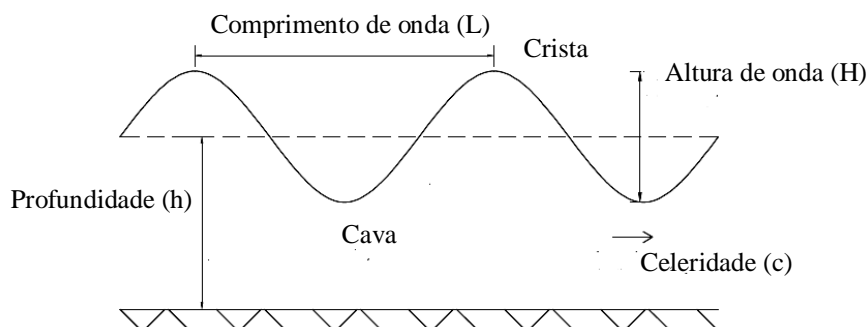


Figura 3.1 – Nomenclatura que caracteriza as ondas (adaptado de APRH, 2007).

A distância vertical entre a crista da onda e a cava adjacente designa-se genericamente como altura de onda (H) e é expressa em metros. Outro parâmetro da onda, importante no âmbito da engenharia costeira, é o comprimento de onda (L), que é a distância entre cristas ou cavas consecutivas, obtido pela equação 3.1, a grandes profundidades (L_0).

O período da onda (T), expresso em segundos, é o intervalo de tempo correspondente à passagem de duas cristas sucessivas por um ponto fixo, e (c) é a velocidade do movimento aparente das cristas. Para grandes profundidades, a celeridade (c_0), não depende da cota dos fundos. Stewart (2008), consoante a onda se propague em águas profundas ou pouco profundas, indica as equações 3.2 e 3.3.

$$L_0 = \frac{g T^2}{2 \pi}; \quad (3.1)$$

$$c_0 = \frac{g}{w}; \quad (3.2)$$

$$c = \sqrt{g h}; \quad (3.3)$$

Em que h é a profundidade, expressa em metros e g é a aceleração da gravidade, igual a 9.81 m/s^2 .

Segundo Brighetti e Martins (2001), em águas profundas ($h/L > 0.25$), a altura significativa das ondas é proporcional à velocidade e duração do vento e comprimento do *fetch*. O *fetch* é a distância da superfície oceânica que pode ser atuada pelo vento, sem obstáculos (APRH, 2007). Em águas pouco profundas ($h/L < 0.05$), o efeito do atrito com o leito compete com a energia transferida pelo vento, limitando assim a altura das ondas.

Outros parâmetros indicativos de uma onda são a frequência (w) e o número de onda (k), traduzidos pelas equações 3.4 e 3.5.

$$w = \frac{2 \pi}{T}; \quad (3.4)$$

$$k = \frac{2 \pi}{L}; \quad (3.5)$$

Para ondas que se propagam em águas médias ou pouco profundas o comprimento de onda local é obtido através da equação 3.6.

$$L = L_0 \tanh(k h); \quad (3.6)$$

3.1.2. Teorias de onda

A teoria das ondas mais elementar é designada por Teoria das Ondas de Pequena Amplitude ou Linear. Desenvolvida por Airy em 1845, representa uma aproximação razoável das características das ondas para uma vasta gama de parâmetros de onda (Demirbilek e Vicent, 2002a). As formulações apresentadas na secção 3.1.1 têm como base a teoria de Airy. Esta teoria assenta nas seguintes condições: onda plana, fluido homogéneo, incompressível e não viscoso, pressão na superfície livre constante e configuração da onda invariante no tempo e no espaço, sendo a equação da superfície livre em função do tempo e do espaço traduzida pela equação 3.7 (Dean e Dalrymple, 2002).

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(k x - w t); \quad (3.7)$$

No que concerne às teorias não-lineares, Fenton (1990) considera como sendo as principais, a teoria de Stokes e a teoria de onda Cnoidal. Usada tanto em águas pouco profundas como em maiores profundidades, a Teoria de Stokes, é apropriada para ondas não muito longas em relação à profundidade da água, enquanto a segunda teoria assume que as ondas são muito mais longas em comparação com a profundidade da água, sendo apropriada para águas pouco profundas. Korteweg e De Vries, no ano de 1895, desenvolveram esta teoria, cujas soluções são fornecidas em termos de integrais elípticas do primeiro tipo, sendo estas idênticas, num limite, à teoria de onda linear e noutra, à teoria de onda solitária, descoberta por Russell em 1844, sendo esta uma única onda em que a massa de água se move inteiramente numa direção (Holmes, 2001).

3.1.3. Processos de transformação

À medida que a onda se propaga em direção à costa vai sofrendo processos de transformação em função da batimetria e da topografia costeira. Sendo assim, a agitação local difere da que se verifica ao largo, ou seja a grandes profundidades (Coelho, 2005).

De seguida, descrevem-se os fenómenos de interação entre as ondas e os fundos, nomeadamente o empolamento e a refração, visto que são os fenómenos com mais interesse no âmbito desta dissertação. Os conceitos de difração, reflexão, rebentação e espraçamento serão abordados de uma forma sintetizada.

Empolamento

Genericamente, o empolamento consiste na alteração da altura da onda devido à redução da profundidade (Figura 3.2), à medida que a onda se aproxima da costa, com uma incidência perpendicular, atingindo a altura máxima no momento precedente à rebentação (Coelho, 2005). Uma vez que se verifica um decréscimo do comprimento de onda como consequência de uma diminuição da velocidade de propagação de onda, proporcionalmente observa-se um aumento da altura da mesma. Isto sucede, para que a quantidade de energia transportada seja a mesma numa área de superfície livre menor (Pereira, 2008).

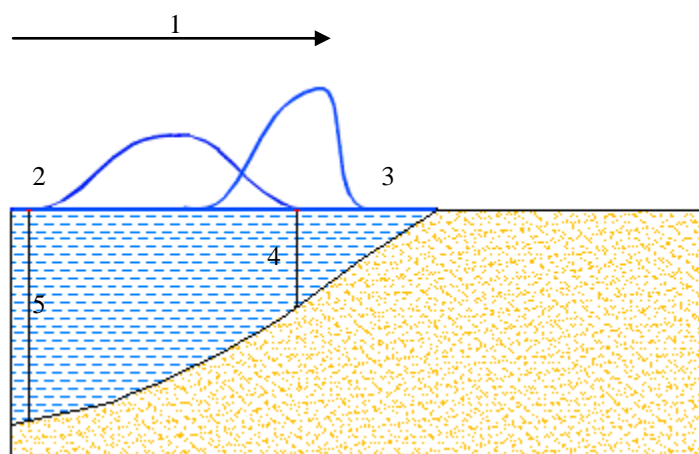


Figura 3.2 – Propagação da onda, fenómeno de empolamento (adaptado de Imamura, 2005). 1. (<) comprimento de onda ----- (>) altura de onda; 2. Cauda da onda; 3. Frente da onda; 4. (<) profundidade -- ----- (>) velocidade; 5. (>) profundidade ----- (<) velocidade.

Refração

Quando as ondas se aproximam da costa, verifica-se que as suas cristas tendem a ficar praticamente perpendiculares a esta (Pereira, 2008). Embora o fator gerador da refração seja a redução da profundidade, a existência de correntes oceânicas não uniformes pode também influenciar este fenómeno.

A parte da onda que se desloca com maior velocidade é aquela que ainda se encontra em águas profundas, enquanto a parte da onda que já entrou em águas rasas, reduz a sua velocidade. Como consequência deste desfasamento de velocidades, as duas partes chegam

à costa com intervalos não muito desfasados entre si, mas não necessariamente ao mesmo tempo.

O'Brien *et al.* (1948) referem que, quando a linha de costa e a batimetria são retas e paralelas, pode-se tratar analiticamente a refração, utilizando a equação 3.8, ou seja, a Lei de Snell. Sendo α o ângulo da ortogonal com a perpendicular à batimétrica.

$$\frac{\sin \alpha}{L} = \frac{\sin \alpha_0}{L_0} = \text{Constante}; \quad (3.8)$$

Porém, existem perfis em que as curvas batimétricas não são paralelas à costa, ocorrendo convergências e divergências, conforme os casos apresentados na Figura 3.3. No que respeita ao primeiro caso, Thurman (1997) afirma que as ondas convergem para um ponto, concentrando mais energia num menor volume de água, levando a um aumento da altura da onda. O mesmo autor argumenta que no segundo caso, as ondas refratadas dissipam a energia ao longo da extensão da costa, implicando uma dispersão da energia por um grande volume de água, o que leva a uma diminuição da altura de onda.

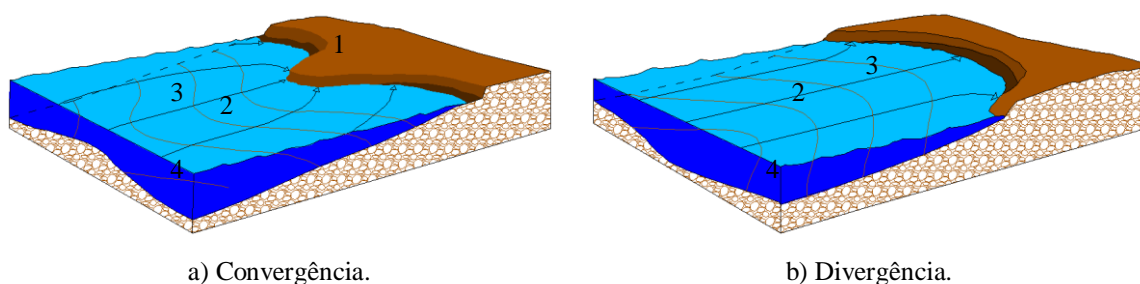


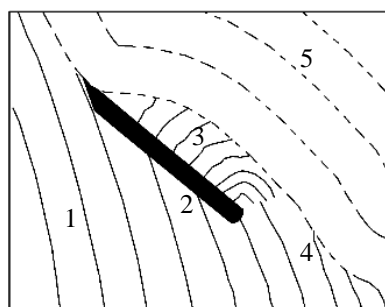
Figura 3.3 – 1. Elevação do terreno; 2. Linhas batimétricas; 3. Direção da ondulação; 4. Profundidade.
(adaptado de Thurman, 1997).

Difração

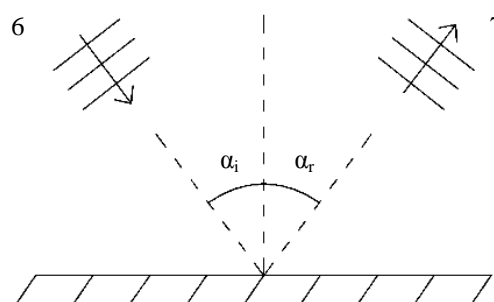
Dean e Dalrymple (1991) dizem que, se o campo de onda apresentar descontinuidades devido à interação com uma estrutura (quebra-mar, por exemplo), dá-se um fenómeno de difração (Figura 3.4a). O principal efeito deste fenómeno consiste num transporte de energia ao longo das cristas, no sentido das zonas em que a altura de onda é menor (Sancho, 2002).

Reflexão

A reflexão das ondas de superfície em meio fluido obedece às leis gerais de reflexão de outros tipos de ondas noutros meios contínuos. Assim, o ângulo de reflexão (α_r) de uma onda deverá ser igual ao ângulo de incidência (α_i), como é ilustrado através da Figura 3.4b. Segundo Sancho (2002) este fenómeno pode ser total ou parcial, formando nodos (o nível de água permanece fixo) e ventres (variação máxima do nível de água). Para assumir se o fenómeno é total ou parcial, as propriedades do objeto onde a onda incide tornam-se importantes. Sendo assim, se as superfícies forem inclinadas, rugosas e permeáveis dá-se uma reflexão parcial, se pelo contrário estas forem verticais, lisas e impermeáveis então a reflexão é total.



a) Difração (adaptado de Thurman, 1997).



b) Reflexão (Coelho, 2005).

Figura 3.4 – 1. Crista das ondas; 2. Quebra-mar; 3. Zona abrigada; 4. Zona exposta. 5. Terreno; 6. Crista das ondas incidentes; 7. Cristas das ondas refletidas.

Rebentação

O fenómeno do afluxo da onda envolve, frequentemente, uma fase prévia de instabilidade: a rebentação. Segundo (Veloso-Gomes, 1981), a rebentação está associada a fenómenos de turbulência, emulsionamento de ar e dissipação de energia (Figura 3.5a).

Espraiamento/ Refluxo

O espraiamento da onda é a distância, medida na vertical, entre o nível da água do mar e a elevação máxima atingida. O fenómeno de espraiamento é dependente da reflexão das ondas e dos efeitos tridimensionais da batimetria, bem como da porosidade, rugosidade, permeabilidade e do nível freático (Coelho, 2005).

Por seu turno, o refluxo da onda é a distância medida na vertical, entre o nível da água do mar e a elevação mínima da mesma.

Na Figura 3.5b ilustra-se um esquema representativo de espraio e refluxo da onda.

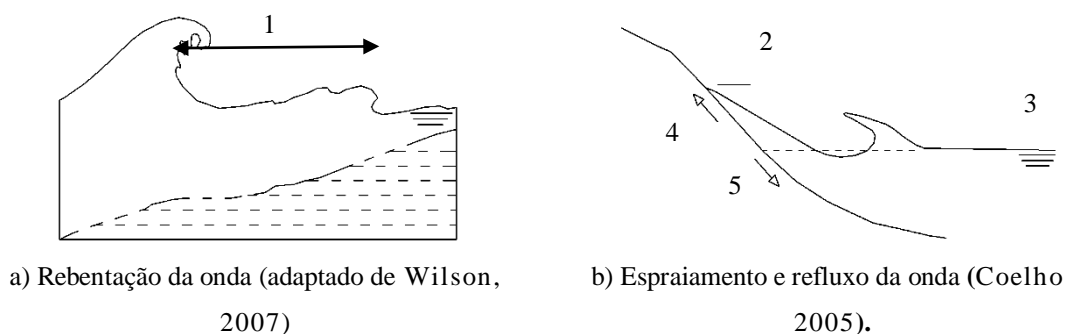


Figura 3.5 – 1. Zona de rebentação; 2. Cota de máximo espraio; 3. Nível médio das águas do mar; 4. Espraio; 5. Refluxo.

3.2. Agitação marítima ao largo

No decurso das três campanhas de campo, procedeu-se à recolha de dados referentes ao clima de agitação, altura significativa e máxima da onda ao largo (H_{s0} e $H_{máx.}$), o período médio e máximo (T_z e $T_{máx.}$) e a direção da ondulação, registados na boia de Leixões e disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico, para os dias em que se realizaram as campanhas, conforme se indica na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Período e número de registos considerados para cada campanha.

Campanhas	Início	Fim	Nº de registos
1ª Campanha	15-10-2012 às 14:40h	17-10-2012 às 11:50h	181
2ª Campanha	14-01-2013 às 00:00h	14-01-2013 às 23:50h	144
3ª Campanha	28-02-2013 às 00:00h	28-02-2013 às 23:50h	143

O número de registos apresentado é o resultado do processamento em tempo real dos registos de 10 minutos. Refira-se que, por vezes, ocorrem falhas de dados, devido a avaria

da boia ondógrafo, causada por falha técnica ou agressão humana, a necessidades de manutenção, ou ainda a dificuldades de transmissão (IH, 2012).

De modo a traduzir graficamente os resultados obtidos na boia de Leixões, nomeadamente da altura de onda significativa e do rumo, definiram-se quatro classes de onda e sete rumos (Figuras 3.6 e 3.7).

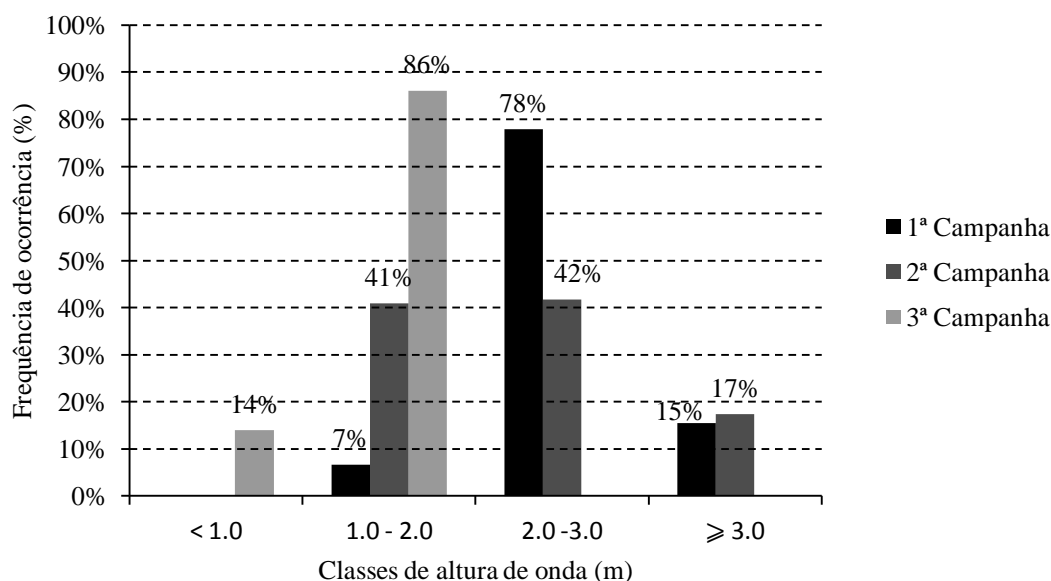


Figura 3.6 – Frequência de distribuição das classes de altura de onda significativa na boia de Leixões, respeitantes às três campanhas de campo realizadas.

Durante a primeira campanha verificou-se que a altura significativa das ondas registadas na boia de Leixões, enquadra-se maioritariamente no intervalo de 2 a 3 metros, com cerca de 78% dos registos a situarem-se nesta classe. Na segunda campanha os resultados foram distintos, verificando-se uma distribuição muito idêntica entre as classes de 1 a 2 metros e de 2 a 3 metros de altura, com 41% e 42% dos registos respetivamente. É de referir que nas duas primeiras campanhas, o número de registos de ondas cuja altura significativa fosse igual ou superior a 3 metros foi similar. Alturas significativas abaixo de 1 m não foram registadas durante o período em que decorreram as duas primeiras campanhas. A terceira campanha apresentou registos de agitação predominantemente no intervalo de 1 a 2 metros (86%). Nesta campanha também foram registadas alturas significativas de onda inferiores a

1 metro (14%). Assim, a terceira campanha foi a que apresentou valores, para a altura de onda significativa, menores, sendo a menos energética das três. É de salientar que na segunda campanha o clima de agitação foi o mais irregular, apresentando registos em três classes. Por outro lado, as alturas de onda registadas na primeira e terceira campanhas foram muito uniformes, sendo enquadrados, na sua maioria, num só intervalo.

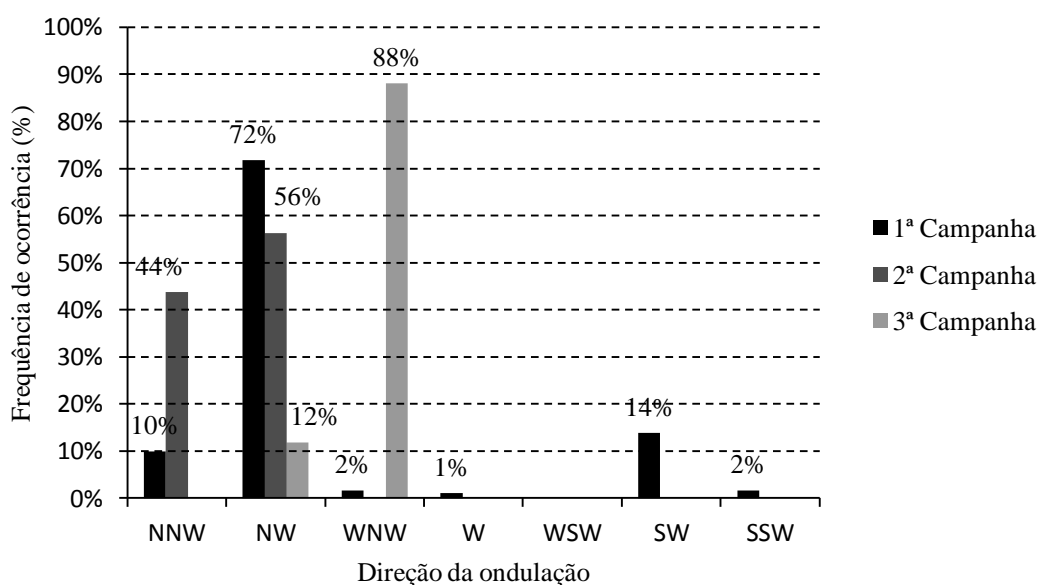


Figura 3.7 – Frequência de distribuição dos rumos de agitação na boia de Leixões, respeitantes às três campanhas de campo realizadas.

Relativamente ao rumo da agitação, na primeira campanha verificou-se uma variação da direção de proveniência da ondulação, havendo registos de todos os quadrantes, desde NNW até SSW. Apesar disso, nesta campanha identifica-se o quadrante NW como sendo o predominante, com 72% das ocorrências. Salienta-se o facto de o rumo SW apresentar uma percentagem significativa de registos, cerca de 14%. Quanto à segunda campanha, o quadrante NW divide a predominância com NNW, sendo que os restantes rumos não têm qualquer registo. No que diz respeito à 3ª campanha, o rumo WNW registou 88% das ocorrências, enquanto 12% das ondas provinham de NW.

A maioria dos registos obtidos nas campanhas de campo vai ao encontro dos rumos de agitação tipicamente observados na costa portuguesa, com predominância geral do quadrante NW.

Para uma melhor compreensão dos fenómenos que podem afetar a altura significativa de uma onda, à medida que esta se propaga em direção à costa, é representado na Figura 3.8a variação deste parâmetro durante os dias em que se realizaram as campanhas de campo, para registos ao largo, que posteriormente serão comparados com os resultados obtidos nos PT, num ponto junto à costa. Na 1ª campanha, o intervalo de tempo representado é entre as 00:00h e as 20:10h do dia 16 de Outubro de 2012. O ondógrafo de Leixões não tem registos para o 1º ciclo de maré, a partir das 20:10h, sendo que este problema prolonga-se para o período correspondente ao 2º ciclo de maré, para o qual não há qualquer registo. Para as restantes campanhas, o período apresentado corresponde aos dias de realização das mesmas.

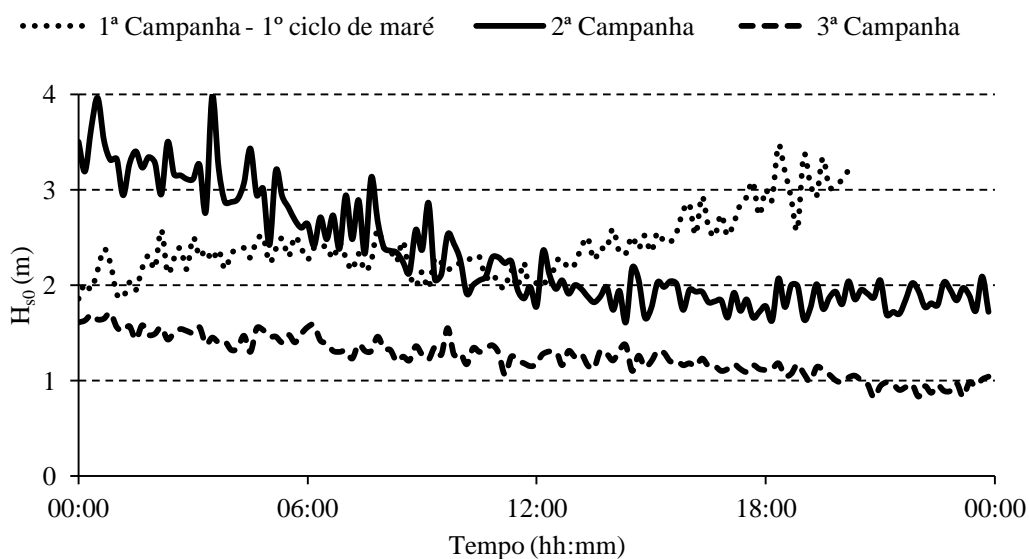


Figura 3.8 – Registos ao largo (boia de Leixões) de alturas de onda significativas, ao longo dos dias das campanhas.

No 1º ciclo de maré da 1ª campanha verifica-se que, desde o início do dia e até às 08:00h a altura da ondulação registada ao largo aumenta. Apresenta um decréscimo entre as 08:00h e as 12:00h, e a partir das 12:00h, começa novamente a crescer até ao fim do dia,

denotando-se aqui um crescimento mais acentuado, quando comparado com o primeiro intervalo de tempo.

A 2ª campanha iniciou-se com a situação mais energética, mas a altura significativa das ondas foi decrescendo desde o início do dia até às 12:00h, momento em que assume um comportamento constante de cerca de 2 metros até ao fim dos registos.

A 3ª campanha apresenta uma tendência decrescente ao longo do período de registo, com alturas de onda entre 1 e 2 metros, não se verificando uma grande discrepância entre os valores de H_{s0} no tempo.

3.3. Agitação marítima na Praia de Mira

Analizada a ondulação registada ao largo, na Figura 3.9 apresentam-se os dados referentes aos registos dos PT (h_{PT}) durante as campanhas de campo. É de referir que os dados dos PT que se encontravam a níveis topográficos mais elevados (PT_{1,2}, PT_{2,2} e PT_{3,2}), não foram tratados, pois os sensores raramente estiveram totalmente submersos.

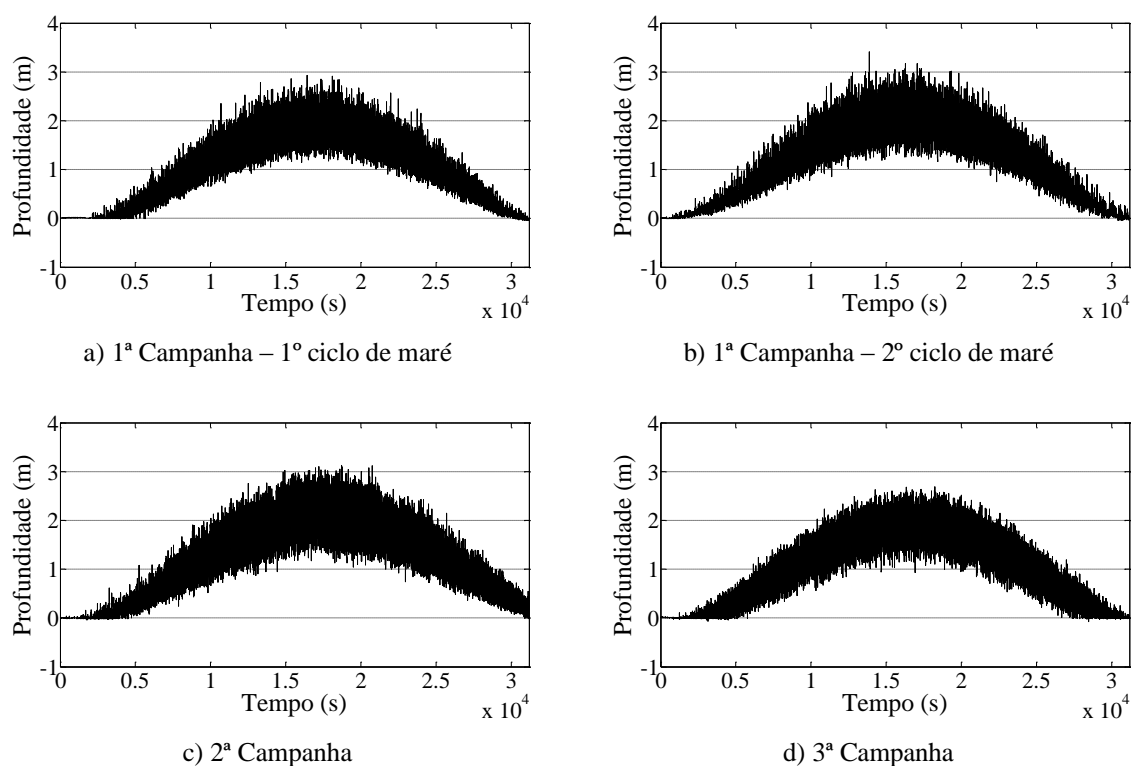


Figura 3.9 – Profundidade dos aparelhos ao longo do tempo, para as diferentes campanhas de campo.

A morfologia da praia está sujeita a várias alterações, havendo deposições e acreções de areia no decorrer das campanhas. Como se referiu, a distância dos sensores à superfície de areia no início e no fim dos trabalhos foi registada, de forma a conseguir estabelecer uma relação profundidade/tempo que permitisse traduzir, aproximadamente, a variação do perfil da praia abaixo do aparelho (Tabela 2.4). Este procedimento foi adotado para todas as campanhas, exceto na segunda, em que se estabeleceu uma cota fixa devido à falta de informação, admitindo-se assim que a distância do aparelho em relação ao fundo foi constante no decurso da campanha. A distância entre o sensor e a superfície de areia foi posteriormente adicionada às medições do PT, de forma a obter a cota da superfície da água relativamente à areia.

Seguidamente aplicou-se um filtro de passa-baixo com uma frequência de corte de 0.05 Hz, para separar as componentes de longo período associadas às marés e às ondas, de grupo das ondas de curto período. Os gráficos obtidos, para as diferentes campanhas, são apresentados nas Figuras 3.10 e 3.11, sendo que o primeiro representa a elevação da superfície livre em relação ao nível médio da água e o segundo a altura da coluna da água.

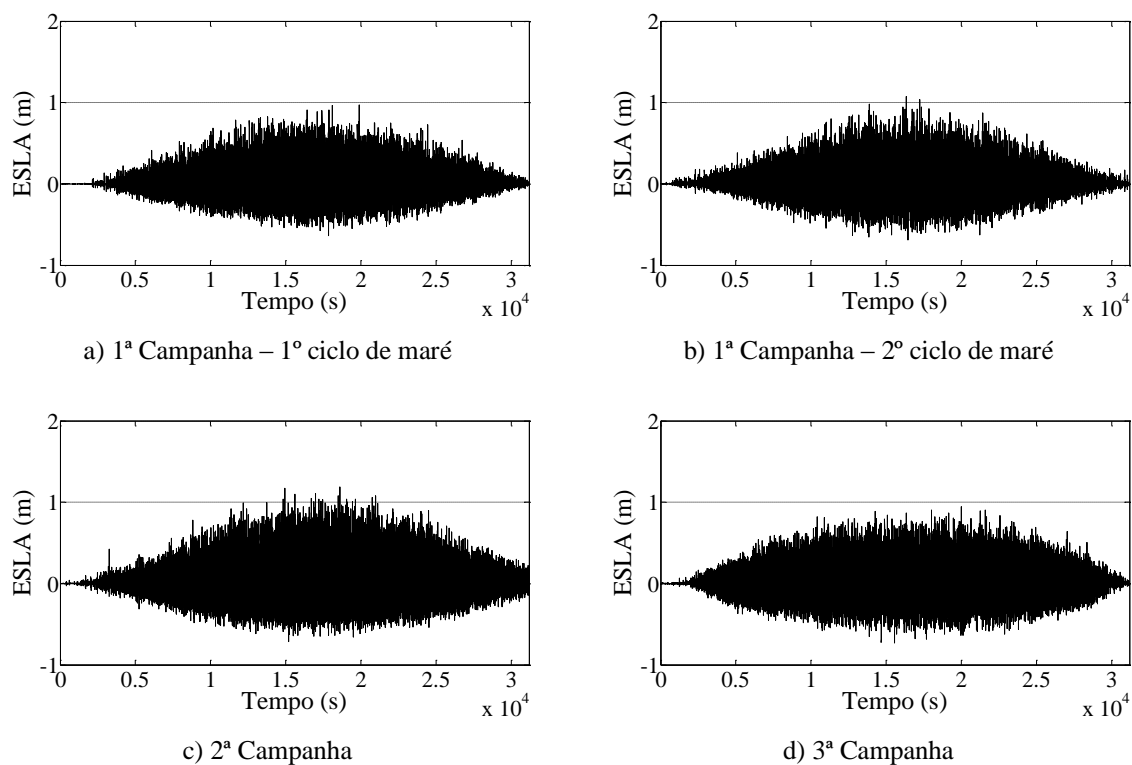


Figura 3.10 – Ondas de curto período, altas frequências. ESLA – Elevação da superfície livre da água.

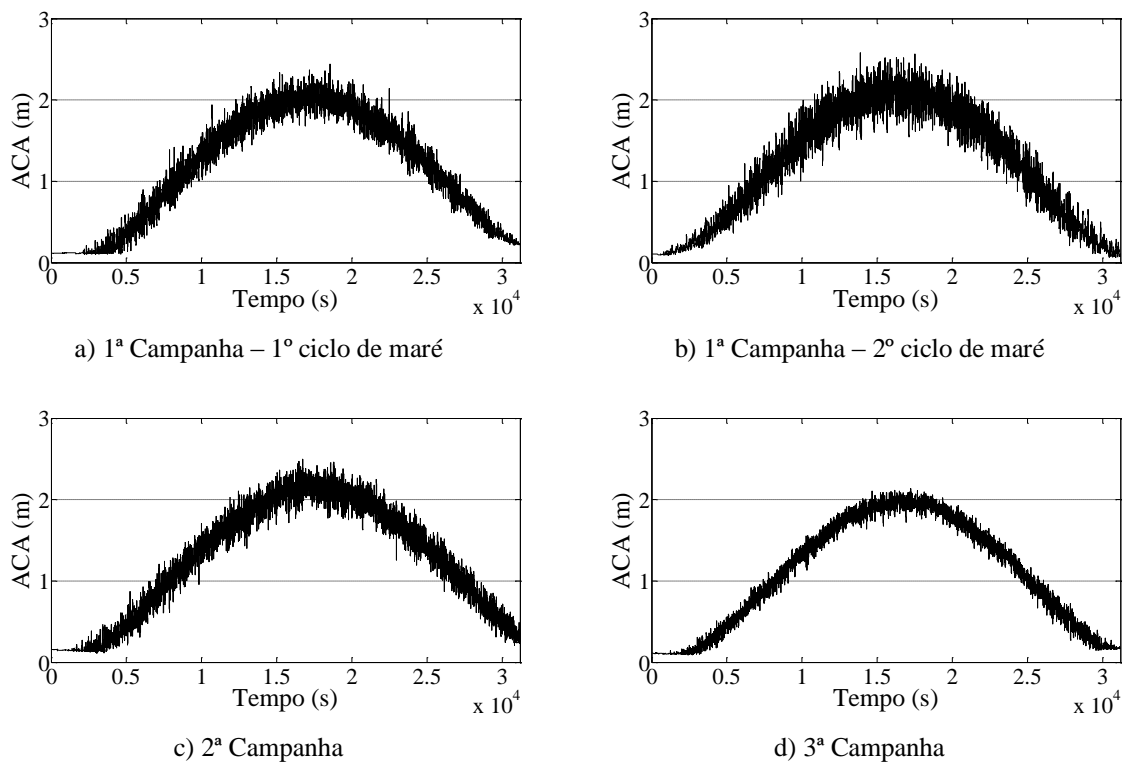


Figura 3.11 – Componentes de longo período associadas às marés, baixas frequências. ACA – Altura da coluna de água.

Os registos obtidos para as altas frequências, onde se englobam as ondas de curto período, conferem um clima de agitação pouco energético, atingindo picos máximos de 1.5 metros. Embora na 3ª campanha os valores máximos atingidos sejam inferiores às restantes, estes prolongam-se durante um intervalo de tempo mais alargado. Nas baixas frequências, referentes ao sinal da maré e ondas de longo período, verificam-se valores máximos de 2.5 metros, sendo a 3ª campanha aquela que apresenta registos inferiores, não ultrapassando os 2 metros.

3.4. Profundidade vs altura de onda na costa

Segundo Soulsby (1997), a altura de onda significativa é obtida através da expressão 3.9.

$$H_s = 4 \sqrt{\sigma^2}; \quad (3.9)$$

σ^2 – variância da elevação da superfície livre.

Após aplicação da expressão 3.9 aos registos apresentados na Figura 3.10, a altura de onda significativa na costa (H_s) resulta da média para cada 10 minutos, durante o período de realização das campanhas de campo. Os valores para a altura da coluna de água (h_c) resultam igualmente da média para cada 10 minutos, mas dos registos apresentados na Figura 3.11. Estes parâmetros servem de base para os seguintes pontos de análise:

- Comparações do clima de agitação entre as três campanhas realizadas, tendo como base os registos dos aparelhos de medição (PT);
- Relação entre a profundidade e a altura significativa da onda;
- Influência dos fundos na altura significativa da onda.

3.4.1. Altura da onda no tempo

A Figura 3.12 representa a altura significativa da onda (H_s) em função do tempo, para registos nos PT. A seleção dos intervalos de tempo para os quais se apresentam as alturas significativas teve em atenção a perceção visual, feita em campo, do primeiro momento em que o aparelho se situa na zona de rebentação. Logo para a 1ª campanha o PT_{1,1} entrou na zona de espraçamento por volta das 12:00h, sendo que às 13:05h iniciou-se a fase em que o aparelho esteve na zona de rebentação. Já para a 3ª campanha o PT_{3,1}, às 12:15h, entrou na zona de espraçamento, às 13:30h na zona de rebentação e por fim, na zona de empolamento, cerca das 15:00h. No que respeita ao 2º ciclo de maré da 1ª campanha e à 2ª campanha, estes valores não foram registados.

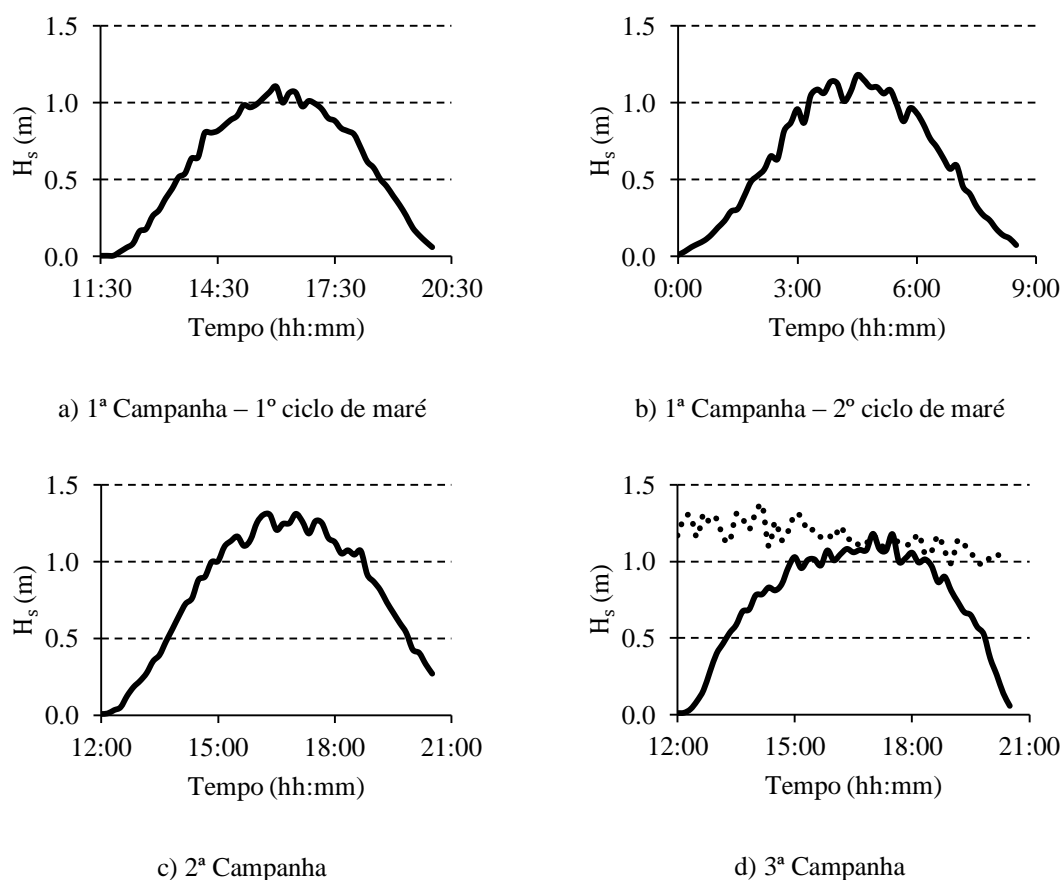


Figura 3.12 – Altura de onda significativa nos PT, ao longo do tempo, para as campanhas de campo. (–) – Altura de onda significativa na costa; (•) – altura de onda significativa ao largo, para a 3ª campanha.

Na 1ª campanha, o clima de agitação para o 1º ciclo de maré apresenta valores máximos de H_s da ordem de 1 metro. Quanto ao segundo ciclo, o gráfico apresenta-se com picos de maior amplitude, embora esteja bem definido um crescimento da onda do início até às 4:00h, momento a partir do qual se manteve constante até às 05:20h, começando depois a decrescer.

Para a 2ª campanha, a forma do gráfico obtido assemelha-se aos da primeira campanha, sendo o intervalo em que se registou maiores alturas de onda compreendido entre as 16:20h e as 17:30h. Ao comparar os registos ao largo com os registos do PT, a altura das ondas ao largo foi sempre maior, como aliás aconteceu para a 1ª campanha.

Já na 3ª campanha, contrariamente às anteriores, as alturas de onda mantêm-se constantes para um intervalo de tempo mais alargado, na ordem de 1 metro de altura, sendo que entre

as 15:00h e as 18:00h tomam valores semelhantes à ondulação registada pelo ondógrafo de Leixões (Figura 3.12d).

Os resultados obtidos indicam que na 1ª e 2ª campanha, durante a preia-mar, o sensor PT esteve sempre na zona de rebentação, enquanto na 3ª campanha o sensor esteve na zona de empolamento.

3.4.2. Altura de onda em função da altura da coluna de água

Na Figura 3.13 estabelece-se a relação entre a altura de onda significativa e respetiva altura da coluna de água, sendo também apresentada a equação da linha de tendência que relaciona os parâmetros referidos, bem como o respetivo fator de correlação (r^2). A linha de tendência foi obtida de maneira a passar na origem, expeto para a 3ª campanha, em que se estabeleceu uma função logarítmica, visto ser a que traduz melhor o comportamento da ondulação registada, no período considerado.

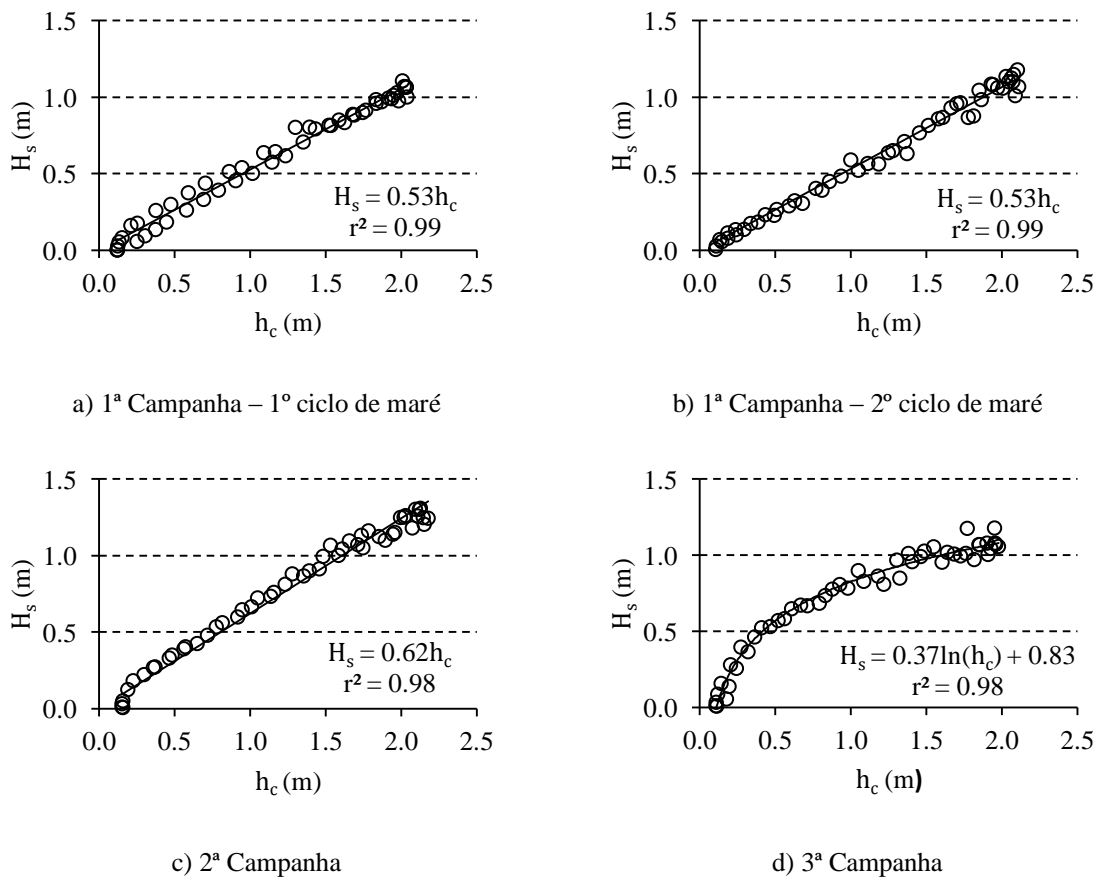


Figura 3.13 – Altura de onda significativa, H_s em função da altura da coluna de água, h_c .

Tanto na 1ª como na 2ª campanha, as alturas significativas das ondas aumentam à medida que a altura da coluna de água cresce, traduzindo-se este aspeto em fatores de correlação muito próximos de um. Este crescimento mútuo comprova, que os aparelhos de medição estiveram a maior parte do tempo na zona de rebentação. Na 3ª campanha, durante a preia-mar o aparelho deixa de estar na zona de rebentação e passa a localizar-se antes desta, ou seja, neste período de tempo estima-se que as ondas passaram pelo PT sem rebentarem.

3.4.3. Relação H_s/h_c no tempo

Por último, avaliou-se a relação (H_s/h_c) ao longo do tempo, sendo a média temporal representada pela linha a tracejado na Figura 3.14.

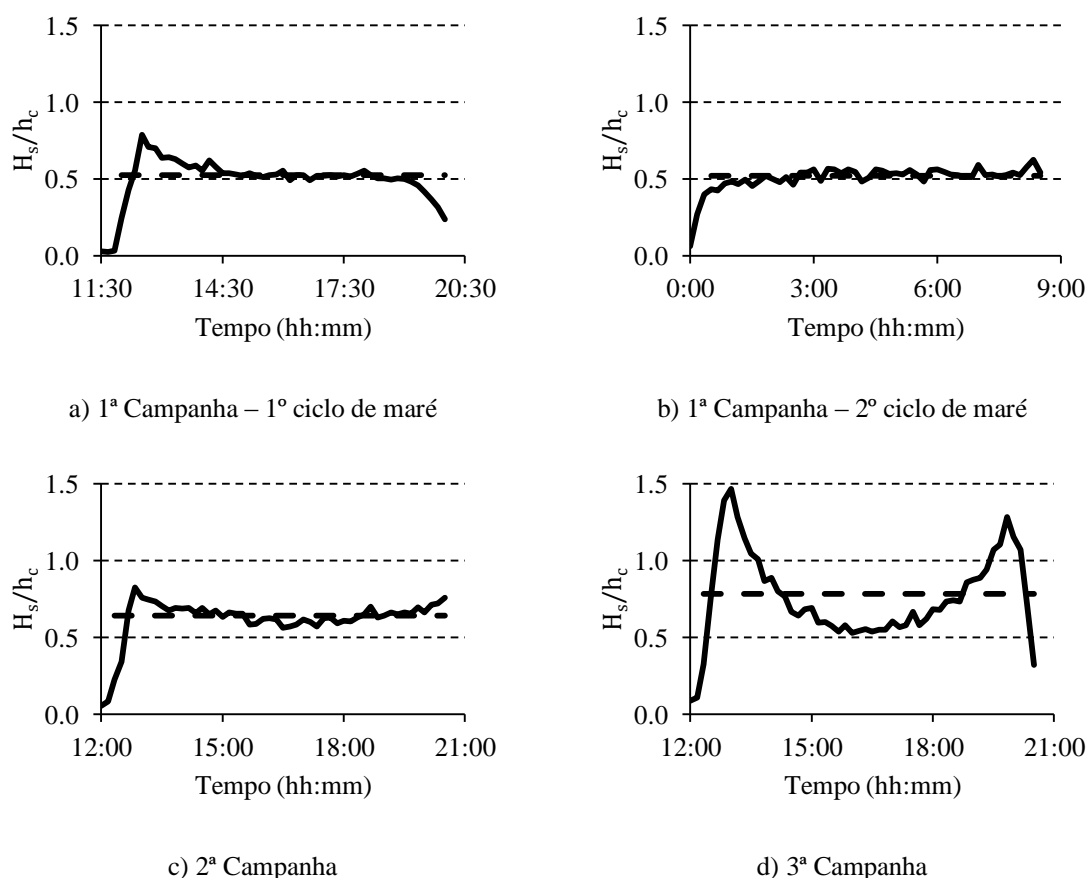


Figura 3.14 – Relação entre altura de onda significativa e a altura da coluna de água, em função do tempo, para as campanhas realizadas (média representada a tracejado).

A média apresentada na Figura 3.14 não diz respeito ao tempo total das medições, pois no início e fim, o sensor registou profundidades e alturas próximas de zero. Assim o valor da

média obtida para a primeira campanha no primeiro ciclo, insere-se no intervalo das 12:00h às 20:00h, enquanto para o segundo ciclo o período considerado é das 00:30h às 08:30h. Na segunda e terceira campanhas selecionou-se um intervalo das 12:20h às 20:30h.

Os valores médios confirmam os resultados da Figura 3.13, expressos em termos dos declives das linhas de tendência. Para a 1ª campanha os valores são praticamente constantes ao longo do tempo, e a média correspondente aos dois ciclos é de 0.52. A 2ª campanha apresenta uma média ligeiramente superior, cerca de 0.64. A 3ª campanha traduz-se num gráfico em forma de parábola, o que indica que a relação entre as variáveis foi-se alterando ao longo do tempo.

3.4.4. Profundidade de rebentação

O início do processo de rebentação da onda e tipo são geralmente determinados em função da profundidade local e do declive de fundo (Santos *et al.*, 2012).

Existem algumas expressões/critérios que permitem determinar a profundidade para a qual ocorre rebentação, sendo a expressão 3.10 uma das mais conhecidas e utilizadas (Soulsby, 1997).

$$H_b = 0.78 h_b; \quad (3.10)$$

Svendsen (1987) e Hansen (1990) propõem duas equações que visam definir a relação entre a altura de onda significativa e a profundidade, para a qual se dá a rebentação da onda. Ao contrário da expressão 3.10, estas equações têm em conta o declive de fundo, que por sua vez depende da altura da onda em águas profundas, podendo ser consultadas em Svendsen (2006).

No decorrer da 3ª campanha sugere-se que o PT esteve na zona de rebentação, verificando-se um aumento progressivo de H_s com h_c , depois na zona de empolamento e posteriormente, aquando a baixa-mar, a zona de rebentação apresentou uma maior extensão. O PT_{3,1} localizou-se a maiores profundidades a partir das 16:00h, durante um intervalo de aproximadamente 50 minutos, durante o qual foram registadas maiores alturas de onda. A estimativa de $(H/h)_b$ foi conseguida fazendo a média dos registos obtidos entre as 16:00h e as 16:50h (período de tempo em que o PT estava antes da rebentação), chegando-se a um valor de 0.54. O ponto de altura máxima da onda bem como o ponto do

índice de rebentação máximo, considerados por Svendsen (2006) como sendo parâmetros que definem o início da rebentação, foram levados em conta na definição do intervalo para o qual se obteve a estimativa.

Existem vários fenómenos que provocam alterações nos parâmetros das ondas que se propagam do largo até a costa (secção 3.1.3). Com base na Figura 3.6, onde se procedeu à divisão da ondulação registada ao largo em classes, verifica-se que para a 3ª campanha, as alturas de onda medidas antes da rebentação no PT apresentam valores similares às observadas ao largo, sendo que ao largo a classe que apresenta maior número de registos é a de 1 a 2 metros, havendo ainda registos de ondas inferiores a 1 metro de altura, o que vai ao encontro dos valores registados pelo aparelho quando este se encontrava a profundidades superiores à zona de rebentação. Devido à morfologia do local de estudo (secção 2.3), os processos de transformação da onda mais relevantes são, o empolamento e a refração. Assim, com recurso a modelos numéricos, irão realizar-se várias corridas de ondas de modo a perceber a influência destes processos nas alturas de onda na costa, de modo a tentar perceber qual dos fenómenos tem mais importância, e o facto de existir a hipótese de haver poucas modificações no decurso da onda do largo até à costa.

Capítulo 4

*Modelação dos processos de
transformação da onda*

Capítulo 4 Modelação dos processos de transformação da onda

4.1. Modelos de propagação da onda

Existem diversos modelos para simular a propagação da onda, podendo referir-se os modelos de propagação de ondas REFDIF (Dalrymple e Kirby, 1991) e DREAMS (Fortes, 2002). Genericamente o modelo REFDIF tem em conta os efeitos da refração, difração (desde que seja na direção transversal à propagação), dissipação de energia por atrito de fundo e rebentação, contempla a presença de correntes e a dispersão por amplitude. O modelo matemático de elementos finitos, DREAMS, descreve os efeitos combinados da refração, da difração e reflexão de ondas lineares harmónicas que se propagam num fundo de inclinação suave (Zóximo *et al.*, 2005).

Outro modelo utilizado para simular a propagação das ondas desde águas profundas até à zona de rebentação é o SWAN (*Simulation Waves Nearshore*). Este modelo numérico representa os efeitos de propagação através do espaço geográfico, considerando os efeitos de refração, difração, empolamento, reflexão devido a correntes opostas e transmissão, e reflexão devido a obstáculos. Tem em conta os processos de geração e dissipação, tais como a geração de ondas devido ao vento, a dissipação por rebentação da crista provocada por mudanças de profundidade e por atrito de fundo e as interações entre ondas (Pereira, 2008).

Um dos objetivos desta tese é simular a propagação das ondas do largo até à costa, comparando os resultados com a informação recolhida aquando da realização das campanhas na Praia de Mira. Os modelos utilizados foram o STWAVE (*Steady-State Spectral Wave Model*) e o GENESIS (*Generalized Model for Simulation Shoreline Change*), descritos com mais detalhe na secção seguinte.

4.2. STWAVE & GENESIS

4.2.1. Descrição dos modelos

Através do conhecimento das características das ondas ao largo nos dias das campanhas de campo (boia de Leixões do Instituto Hidrográfico), pretendeu-se quantificar as alterações que ocorrem no decurso das transformações de onda entre condições ao largo e condições

próximo à costa. Para isto, foi utilizado o modelo STWAVE, capaz de simular a propagação do clima de agitação de condições *offshore* para *nearshore*, apresenta as variações tanto da altura significativa da onda como do rumo característico, até à profundidade de fecho. Este sistema apenas efetua a propagação em direção à costa, difração (simplificada), refração e empolamento das ondas, não quantificando fenómenos de refração de ondas provenientes da costa (por exemplo por reflexão). Refere-se também que o modelo não inclui dissipação de energia por atrito no fundo e as correntes são mantidas constantes ao longo da coluna de água (Pereira, 2012).

Por sua vez, o GENESIS é um modelo numérico que simula as alterações da posição da linha de costa ao longo do tempo, com base no transporte longitudinal. Este modelo serve igualmente para aquisição de parâmetros como a altura significativa e o rumo da ondulação na zona de rebentação. A movimentação da linha de perfil da costa resulta essencialmente do transporte sedimentar que acontece paralelamente à praia, sendo este provocado pelas ondas e pelas correntes que estas induzem, em função da altura e do ângulo de incidência das mesmas.

Os resultados dos modelos serão apresentados nas secções 4.2.3 e 4.2.4 deste capítulo, tendo em conta que os resultados do modelo STWAVE constituem valores de entrada para o modelo GENESIS, cujos resultados finais permitirão uma comparação com os dados recolhidos no decorrer das campanhas de campo (Figura 4.1).

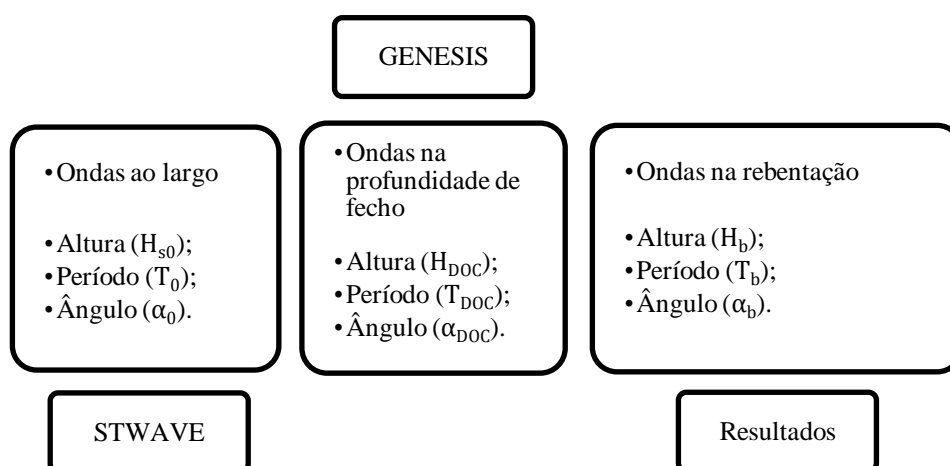


Figura 4.1 – Organograma representativo dos parâmetros obtidos na modelação da onda.

4.2.2. Condições de modelação

A área de modelação compreende o domínio entre o esporão do Poço da Cruz e o esporão Sul de Mira abrangendo ainda uma extensão de cerca de um quilómetro a Norte do esporão do Poço da Cruz e cerca de um quilómetro a Sul do esporão Sul de Mira. A informação batimétrica e topográfica necessária para executar os modelos de propagação de onda foi introduzida através da ferramenta *Grid Generation* (Figura 4.2). No modelo STWAVE, a profundidade média da boia considerada foi de 83 metros, sendo também elaborada uma grelha retangular de malha quadrada, com 50 metros de lado.

No que diz respeito ao GENESIS existe uma restrição imposta pelo *software*, que indica que o espaçamento da malha do modelo não pode ser inferior ao espaçamento definido para a malha da grelha do modelo STWAVE. O domínio espacial do GENESIS é diferente do domínio espacial definido para a simulação da propagação de ondas do largo até à costa, devendo um ser ortogonal ao outro. No GENESIS, definiu-se uma grelha de Sul para Norte com um espaçamento de 20 metros, sendo a profundidade de fecho de 12 metros e tendo um comprimento de 7840 metros referente à linha de costa. O domínio computacional definido permite a identificação de estações em posições específicas da grelha gerada, consideradas preferencialmente à profundidade de fecho, onde são guardadas as características da onda após simulação da propagação das ondas no STWAVE. Estes dados foram utilizados posteriormente na estimativa do caudal sólido longitudinal calculado com o modelo GENESIS.

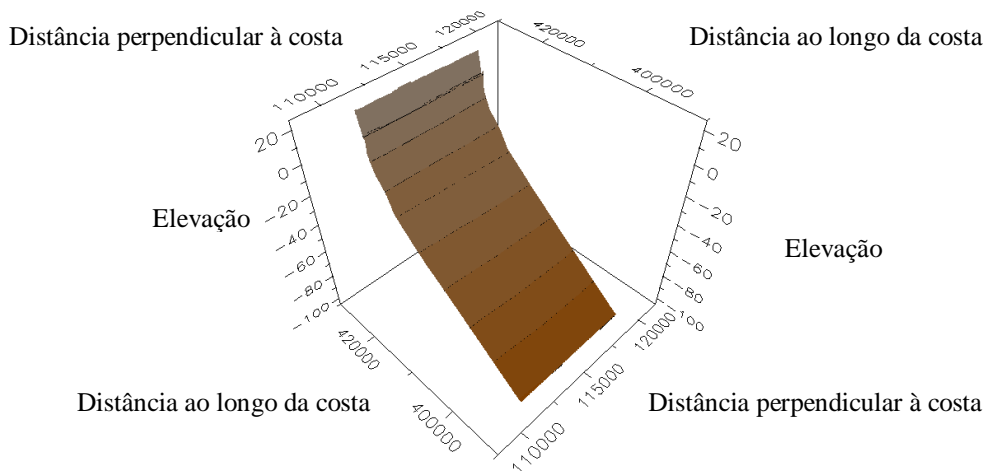


Figura 4.2 – Representação em 3D da grelha do modelo STWAVE.

As características da agitação usadas como dados de entrada no programa STWAVE resultam da análise feita na secção 3.2 desta dissertação, sendo referentes à 3ª campanha.

O critério para a seleção das ondas representativas teve em atenção a classe da altura de onda e a direção da ondulação, sendo os parâmetros de cada onda tipo a média dos registos da ondulação ao largo para cada classe de alturas e rumos.

A 1ª onda tipo abrange os registos inferiores a 1m de altura e com uma direção NW. Para a 2ª onda considerada, a classe mantém-se, e o rumo é de WNW. Na 3ª e 4ª ondas as alturas variam de 1 a 2 metros alternando a sua direção, NW e WNW, respetivamente (Tabela 4.1). A_0 representa o ângulo que a onda faz com o Norte.

Tabela 4.1 – Características iniciais das ondas no STWAVE.

Onda	H_{s0} (m)	T_0 (s)	A_0 (°)	Frequência (%)
1	0.92	6.28	-45.0	2.80
2	0.93	5.87	-67.5	11.19
3	1.19	5.10	-45.0	9.09
4	1.32	5.23	-67.5	76.92

A frequência referida na Tabela 4.1 retrata a percentagem de ocorrência das diferentes ondas na 3ª campanha. A análise sugere que o último evento apresenta maior número de ocorrências, sendo que para esta divisão os períodos das ondas não foram alvo de nenhum tratamento estatístico.

4.2.3. Evolução da onda desde o largo até à profundidade de fecho

O *software* utilizado produz ficheiros do tipo imagem, onde é possível ter uma perceção da propagação da ondulação no trecho em estudo.

A Figura 4.3 mostra a evolução da altura de cada onda característica, representada por um gradiente colorido, conforme a escala apresentada, e a evolução da direção das ondas representada por vetores.

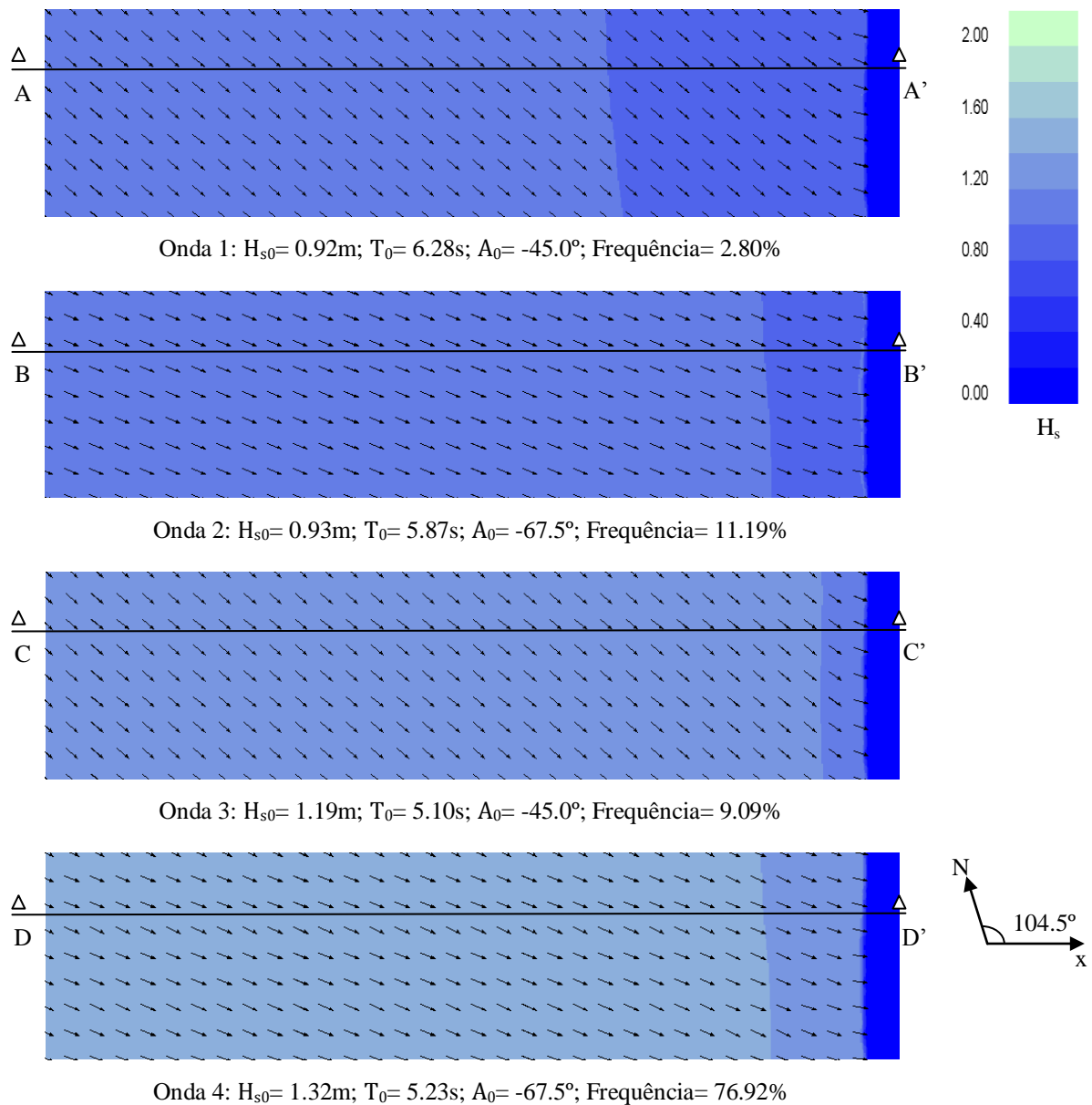


Figura 4.3 – Evolução dos rumos e alturas das ondas características, após propagação no STWAVE. A_0 – Azimute da onda propagada.

De acordo com as imagens, a altura da onda tende a diminuir à medida que se aproxima da costa, embora para profundidades mais elevadas este parâmetro se mantenha praticamente constante. Quanto à direção, observa-se uma reorientação dos vetores, que definem a onda, para direções perpendiculares à costa. Estes comportamentos conjugam simultaneamente os efeitos do empolamento e da refração.

Na Figura 4.3 foram ainda assinalados cortes desde o largo até à zona de montagem dos equipamentos nas campanhas de campo. Estes cortes são apresentados na Figura 4.4, de modo a visualizar a variação da altura de onda nesses perfis.

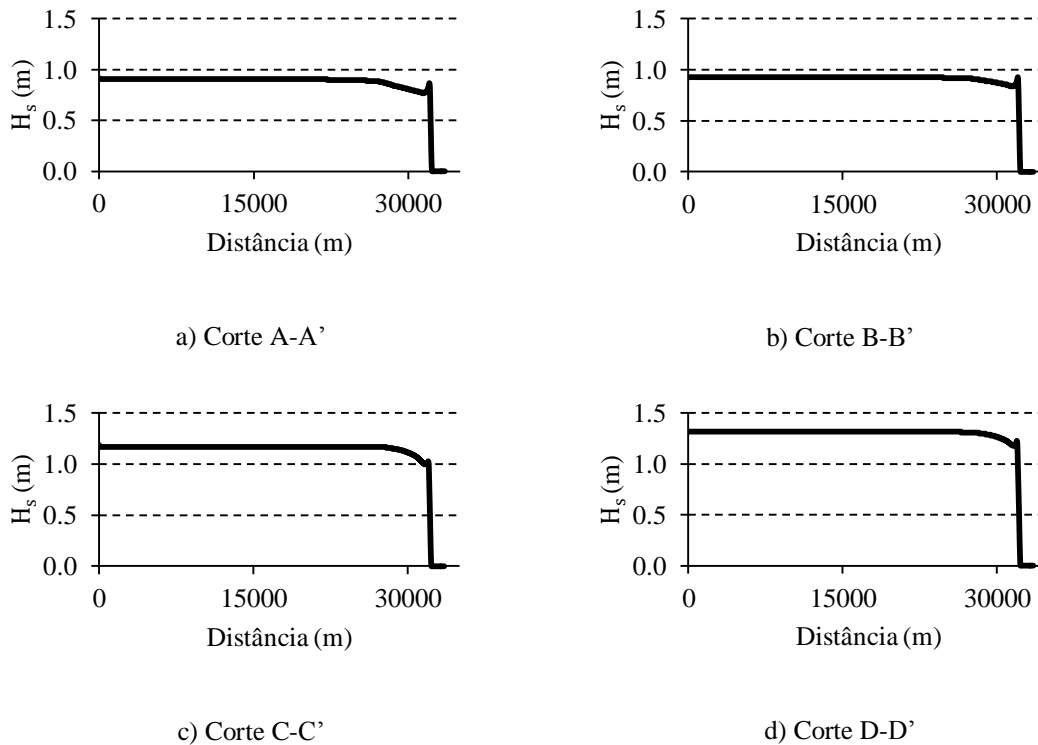


Figura 4.4 – Evolução das alturas de ondas propagadas perpendicularmente ao local de medição.

A Figura 4.4 mostra que as ondas mantêm uma altura praticamente constante durante a maior parte do percurso, verificando-se depois uma diminuição deste parâmetro, seguindo-se um ligeiro aumento, possivelmente relacionado com o início do fenómeno de empolamento. Este fenómeno é mais visível nas ondas que partem com alturas inferiores, que após uma redução gradual atingem, próximo da costa, alturas semelhantes às iniciais. Por outro lado, as ondas com H_{s0} superiores sofrem uma diminuição mais abrupta perto da costa, sendo o fenómeno de empolamento menos evidente.

4.2.4. Comparação da agitação ao largo, na profundidade de fecho e junto à costa

A altura significativa da onda na rebentação é fundamental na avaliação do transporte sólido longitudinal, nomeadamente na aplicação das formulações numéricas utilizadas para estimar os volumes em transporte. Como referido anteriormente, a propagação das ondas

simulada através do STWAVE permitiu a obtenção da altura de onda na profundidade de fecho, recorrendo-se posteriormente ao GENESIS, de forma a obter as características da onda na rebentação. Na Figura 4.5 apresentam-se as alturas de cada onda tipo ao largo, na profundidade de fecho e na costa.

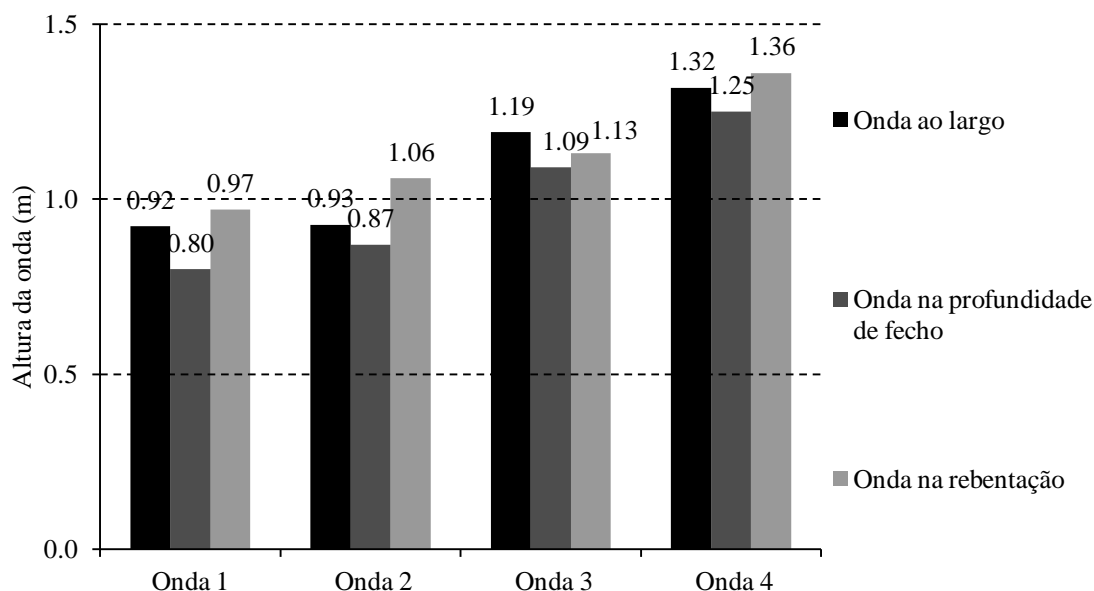


Figura 4.5 – Evolução da altura de onda do largo para a costa, obtidas por simulação numérica.

As alturas de onda não variam significativamente nos três pontos apresentados. Alturas de onda superiores registam-se na zona de rebentação, exceto para o 3º caso em que a altura de onda ao largo é maior do que a registada na rebentação. Assim, compreende-se que o fenómeno de refração é o que afeta de forma mais significativa a altura das ondas até à profundidade de fecho, enquanto na rebentação o fenómeno de empolamento é o mais presente.

Nesta secção fez-se ainda a analogia entre os resultados obtidos em campo e os dados modelados. De acordo com a análise feita na secção 3.4.3, onde se estabeleceu uma estimativa para a relação entre o H_s e o h_c na zona de rebentação, a média das alturas de onda que serviram de base para o valor obtido foi de 1.06 metros, sendo comparável com o resultado obtido com a onda 2 da modelação. Este resultado permite constatar que, possivelmente, as ondas com menor altura passaram, num dado período de tempo, pelo

aparelho sem rebentarem, sendo que as ondas com altura superior, ondas 3 e 4, rebentaram antes da chegada ao aparelho.

Da mesma forma que a altura significativa da onda, o ângulo que a onda faz com a perpendicular à linha de costa na rebentação (α_b), é importante para a obtenção do transporte sólido longitudinal pelas fórmulas empíricas. Este ângulo define igualmente o sentido do transporte longitudinal, ou seja, pequenas variações do ângulo influenciam a estimativa do caudal sólido. Na Figura 4.6 apresenta-se a variação dos ângulos para o trecho em análise, considerando as ondas ao largo, na profundidade de fecho e na rebentação.

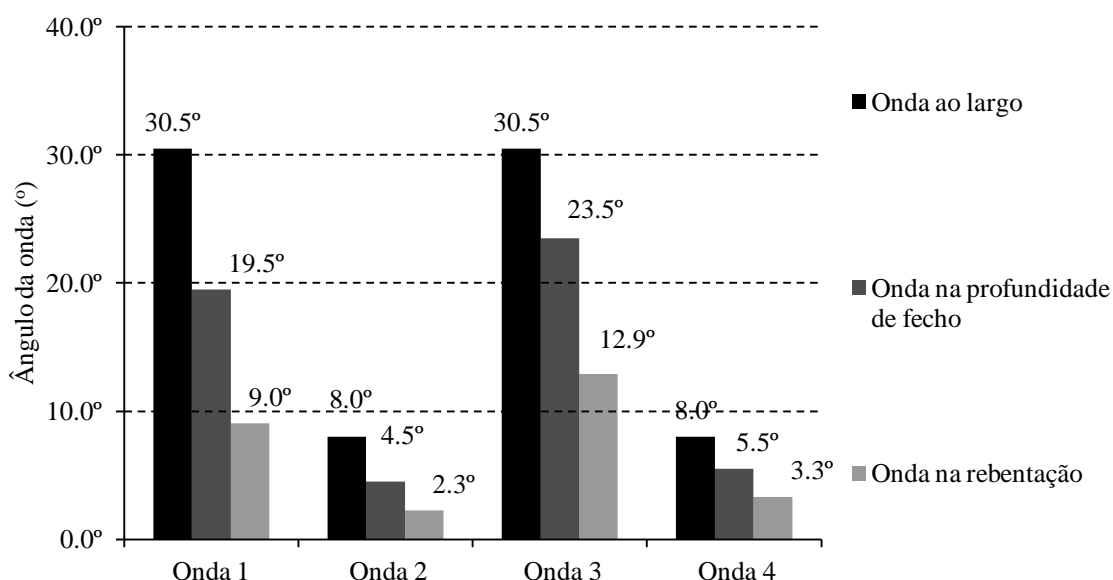


Figura 4.6 – Evolução da direção de onda do largo para a costa, considerando o ângulo da onda com a linha de costa.

Os ângulos das ondas propagadas, à medida que se aproximam da costa, vão ficando próximos de zero. Nas ondas provenientes de NW, o fenómeno da refração é mais evidente, embora as ondas de WNW cheguem à zona de rebentação com α_b inferiores. Verifica-se igualmente que as ondas com menor altura tendem a ficar mais perpendiculares à costa do que aquelas com alturas superiores.

Analogamente às alturas de onda, os ângulos na zona de rebentação, especialmente para ondas provenientes de WNW atingem valores semelhantes aos medidos no campo, que serão apresentados aquando da análise das velocidades, no capítulo 5.

Capítulo 5

Velocidades e concentração de sedimentos

Capítulo 5 Velocidades e concentração de sedimentos

5.1. Velocidades longitudinais e transversais

5.1.1. Orientação/ Tempo de recolha de dados/ Calibração/Sentido

Com objetivo de medir as componentes longitudinais e transversais da velocidade, foram instalados nos tripés de apoio um ECM por cada campanha, embora só se tenham obtido resultados para a 3ª campanha, realizada no mês de Fevereiro de 2013. Nas restantes campanhas, os ECM chegaram ao fim sem qualquer registo, devido a problemas técnicos.

Na 3ª campanha, a orientação do ECM₃ foi feita através de uma bússola. O ângulo entre o sensor de temperatura (Y) e o Norte foi medido com auxílio de um fio: Sistema local de coordenadas do ECM: Y – para terra, X – 90° sentido anti-horário relativo a OY. Na Figura 5.1 encontra-se o esboço que ilustra o ângulo medido com a bússola.

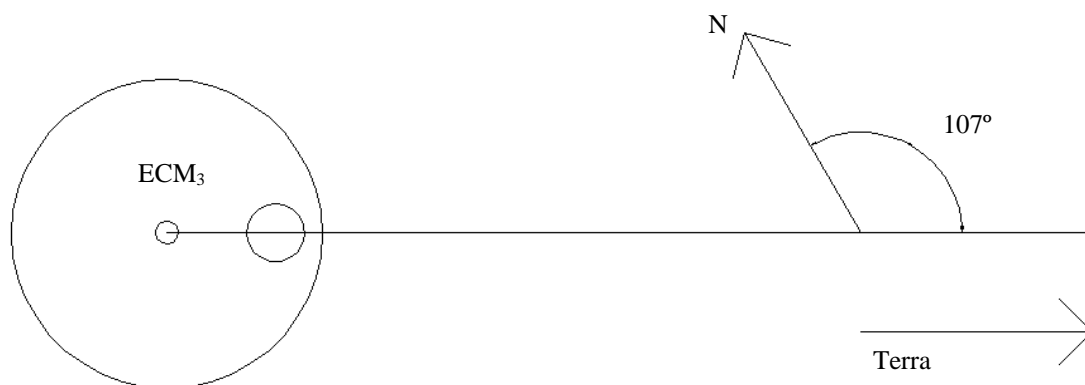


Figura 5.1 – Orientação do ECM em relação ao Norte.

O intervalo de tempo para o qual se procedeu à recolha dos dados do ECM₃ foi das 13:30h às 19:00h. Este intervalo difere do que foi considerado para o PT_{3,1}, coincidindo maioritariamente com uma medição na zona de rebentação e antes desta, assegurando que o aparelho estava submerso.

Os sensores de velocidades ECM, são muito utilizados e de fácil manuseamento, mas os dados que recolhem podem ser afetados por falhas do próprio equipamento, turbulências picos de ruído e outros efeitos, pelo que é necessário fazer uma validação dos dados

registados. Assim, numa primeira fase contabilizaram-se os dados compreendidos no intervalo escolhido, verificando-se em alguns instantes a inexistência de dados, ou a existência de valores irreais. A percentagem de valores anómalos encontrados foi baixa em relação à amostragem, correspondendo a 0.12%. De modo a colmatar as falhas referidas optou-se por fazer a média do minuto anterior e posterior, sendo o intervalo em falta preenchido com o valor obtido.

Posteriormente procedeu-se à calibração das componentes das velocidades. Para tal foi calculada a intensidade da velocidade através da equação 5.1.

$$V_{xy} = \left(1 + \beta \frac{4 v_x^2 v_y^2}{v_x^2 + v_y^2} \right) * \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \quad (5.1)$$

em que $\beta = 0.1$, sendo a constante de calibração do ECM. Com base nos valores de v_x e v_y determinou-se o ângulo θ_{xy} através da equação 5.2:

$$\theta_{xy} = \frac{(\tan^{-1}(v_x/v_y) + \gamma) 180}{\pi}; \quad (5.2)$$

Em que $\gamma = 0$ para $v_y \geq 0$, $\gamma = \pi$ para $v_y < 0$, sendo θ_{xy} o ângulo entre o eixo Y e V_{xy} , como se pode observar na Figura 5.2.

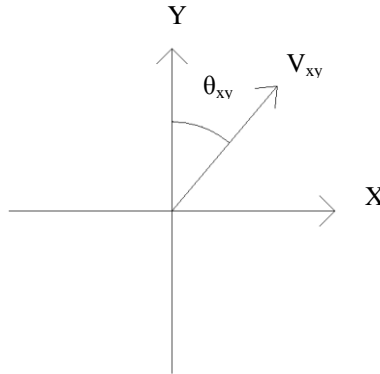


Figura 5.2 – Esquema que caracteriza o do ângulo θ_{xy} entre o eixo Y e V_{xy} .

Por fim, obtiveram-se as componentes da velocidade, V_x e V_y calibradas, através das equações 5.3 e 5.4.

$$V_x = V_{xy} \sin \theta_{xy}; \quad (5.3)$$

$$V_y = V_{xy} \cos \theta_{xy}; \quad (5.4)$$

Após calibração das velocidades definiu-se para a componente longitudinal o sentido Norte – Sul como sendo o positivo e para a componente transversal, o sentido positivo arbitrado foi para a costa (Figura 5.3).

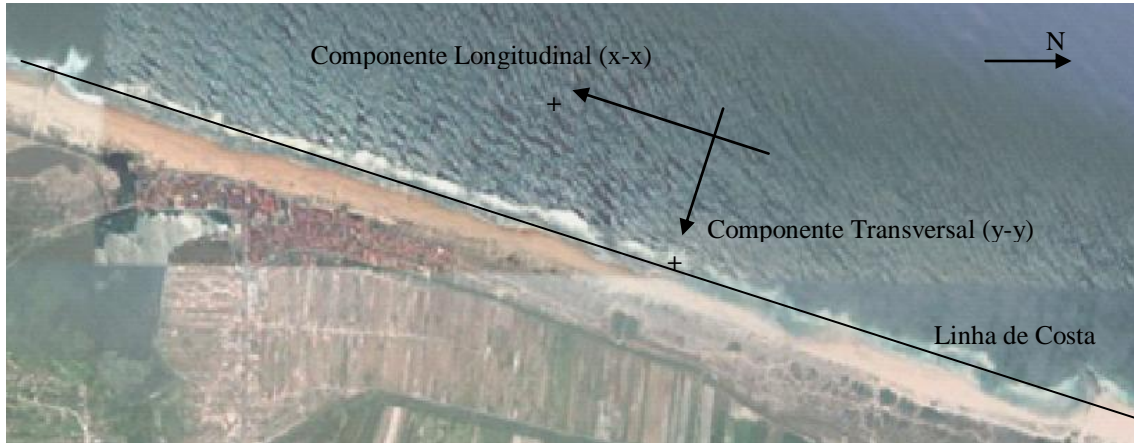


Figura 5.3 – Definição das componentes da velocidade (V_x e V_y).

5.1.2. Processamento e análise de dados

As componentes da velocidade do escoamento V_x e V_y , após calibração, são apresentadas na Figura 5.4, para o intervalo de tempo considerado na campanha 3.

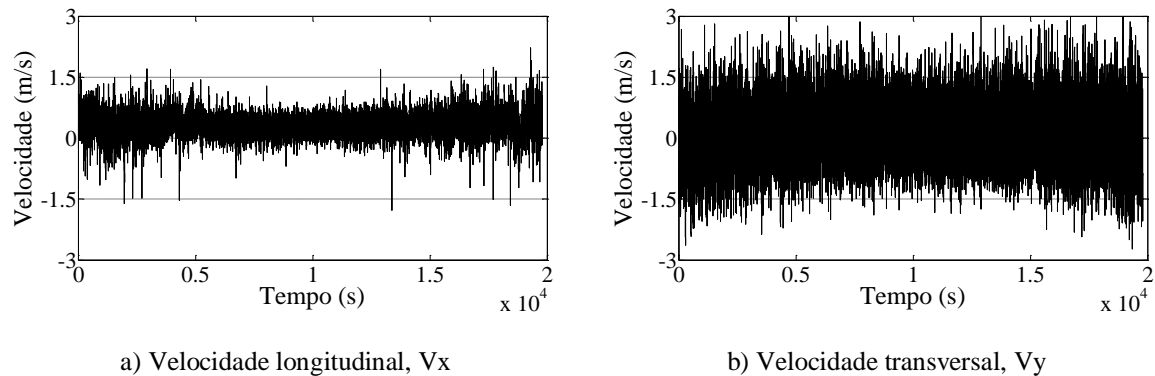


Figura 5.4 – Velocidades (V_x e V_y) entre as 13:30h até às 19:00h do dia 28 de Fevereiro de 2012.

Os gráficos acima contabilizam um total de 198000 registos ao longo do tempo. A componente V_x , define-se como sendo a responsável pelo transporte sólido paralelo à praia, enquanto a componente V_y caracteriza o transporte de sedimentos na direção perpendicular à costa. A componente longitudinal assume maioritariamente sinal positivo o que corresponde a uma predominância do escoamento no sentido Norte – Sul, ao contrário da componente transversal, onde se denota uma alternância de sinal equivalente ao longo do período de recolha de dados, associada às velocidades orbitais.

A obliquidade com que as ondas chegam à praia faz com que as velocidades registadas possam não corresponder à realidade, pois poderia haver um desvio da orientação do sensor face à verdadeira orientação longitudinal e transversal. Assim, a Figura 5.5 representa a dispersão de pontos com a respetiva linha de tendência. Esta análise é importante uma vez que, para o cálculo do transporte sedimentar, irão utilizar-se formulações numéricas com interações entre ondas e correntes, nas quais se consideram os respetivos ângulos da ondulação na rebentação (α_b).

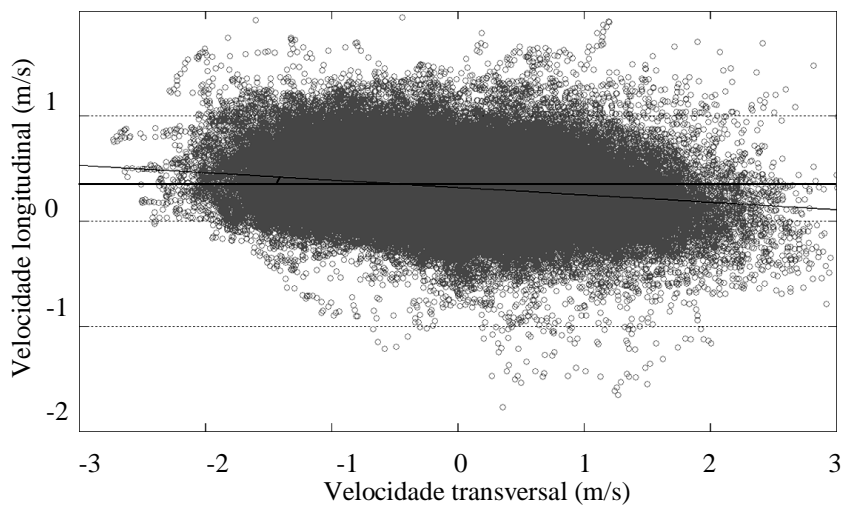


Figura 5.5 – Dispersão de valores da velocidade transversal e longitudinal (a linha de tendência tem um desvio com a horizontal de cerca de 4°).

Através da Figura 5.5 considera-se que o alinhamento do equipamento foi colocado suficientemente próximo das direções pretendidas, pelo que não se efetuou nenhuma correção à orientação dos registos. Verifica-se ainda que o desvio com a horizontal de 4°,

aproxima-se dos valores de α_b obtidos no capítulo anterior, principalmente para os casos das ondas 2 e 4.

A Tabela 5.1 representa o tratamento estatístico dos dados da Figura 5.4, de modo a perceber o comportamento das componentes da velocidade ao longo da campanha.

Tabela 5.1 – Tratamento estatístico das componentes da velocidade V_x e V_y .

Componentes da velocidade	Média	Moda	Máximo	Mínimo
V_x (m/s)	0.327	0.440	2.217	-1.773
V_y (m/s)	-0.091	-0.026	3.616	-2.731

Em média, a velocidade longitudinal, toma valores superiores aos registados na componente transversal, facto evidenciado também pela moda da amostra, embora os valores extremos (positivos e negativos) sejam superiores para V_y . Conclui-se ainda que a componente longitudinal da velocidade, toma valores mais uniformes na maior parte do período de realização da campanha, enquanto V_y apresenta uma amplitude superior, indicando que as ondas incidiram sobre a costa com uma direção aproximadamente perpendicular.

A Figura 5.6 representa os valores médios de V_x e V_y , em intervalos de 10 minutos, sendo estes comparados com os diferentes valores da altura da coluna de água registada no PT_{3.1}, para o intervalo referido.

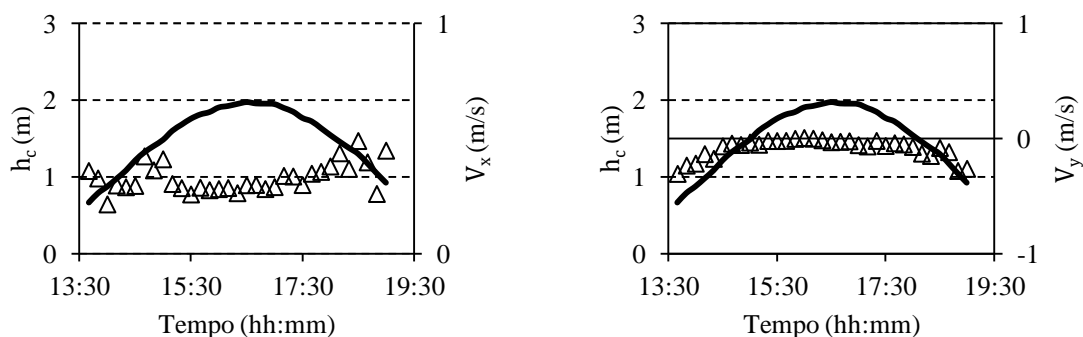


Figura 5.6 – Média a cada 10 minutos, das componentes da velocidade (V_x e V_y) vs profundidade.

Geralmente, a componente longitudinal da velocidade tem valores superiores para profundidades pequenas, sendo que se mantem praticamente constante das 15:30h até as 17:30h, correspondente a maiores profundidades. Nos intervalos de 10 minutos, a componente V_x da velocidade é sempre positiva, e varia num intervalo entre 0.2 m/s e 0.5 m/s. Para a componente transversal (V_y), os valores médios em cada 10 minutos são sempre negativos, retratando predominância do vetor velocidade no sentido do refluxo da onda, embora estes valores sejam, na sua maioria, próximos de zero. Os picos da componente transversal registam-se para profundidades baixas, com máximos de 0.30 m/s.

5.2. Concentração de sedimentos na Praia de Mira

5.2.1. Calibração

A recriação, em ambientes controladas das condições a que os aparelhos são sujeitos durante as campanhas de campo é algo difícil de conseguir (Downing, 2006). Devido à sensibilidade dos sensores OBS, às características dos sedimentos, à presença de bolhas na zona de rebentação (Puleo *et al.*, 2006), às condições de luminosidade (Sutherland *et al.*, 2000) e à interferência de corpos orgânicos (peixes, insetos, etc.), o processo de calibração torna-se alvo de várias imprecisões. Assim, foram recolhidas amostras da areia que caracterizam o local de estudo, durante o período de realização das campanhas de campo, no ponto de localização dos aparelhos (secção 2.3.4). Com estas amostras foram realizados testes no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, com o objetivo de determinar as retas de calibração dos três OBS, utilizados nas campanhas de campo. A areia foi sendo introduzida de forma faseada (1g, 5g, 10g, 20g, 50g, 100g, 200g e 500g) num recipiente com 5 litros de água, enquanto uma misturadora aplicava movimento à água e aos sedimentos, mantendo-os em suspensão. À medida que eram introduzidas porções de sedimento, o OBS registava o sinal correspondente às diferentes concentrações (Figura 5.7).

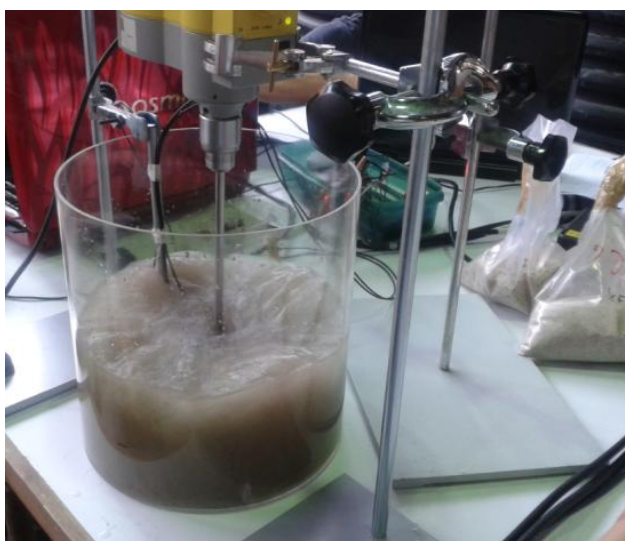


Figura 5.7 – Misturadora e sedimentos, durante o processo de calibração dos OBS.

A calibração foi feita, considerando o sinal registado em intervalos de 40 segundos para cada concentração, fazendo-se a média e o desvio padrão para cada intervalo de tempo.

Segundo o manual dos OBS utilizados (IM, 2008), os aparelhos conseguem obter resultados fiáveis até um máximo de 100 g/L. O valor limite de calibração dos OBS obtido foi de 120 g/L, pois acima desta concentração a resposta dos OBS começa a ser similar à obtida com concentrações menores. Para o sensor OBS_{3.1}, não existiu uma tendência vincada do sinal com a variação da concentração de sedimentos. Assim, optou-se por realizar uma segunda calibração para este sensor, aproveitando-se para repetir a calibração dos outros dois. A imprecisão dos dados obtidos pelo OBS_{3.1}, na 1ª calibração, pode estar relacionada com o facto de ser necessário um período mais alargado de tempo para que o sinal estabilizasse. Optou-se então por fazer medições com intervalos de 3 minutos para as diferentes concentrações, tendo sido possível estabelecer uma reta de calibração.

A Figura 5.8 representa os gráficos de calibração obtidos para os diferentes sensores, tal como o fator de correlação correspondente.

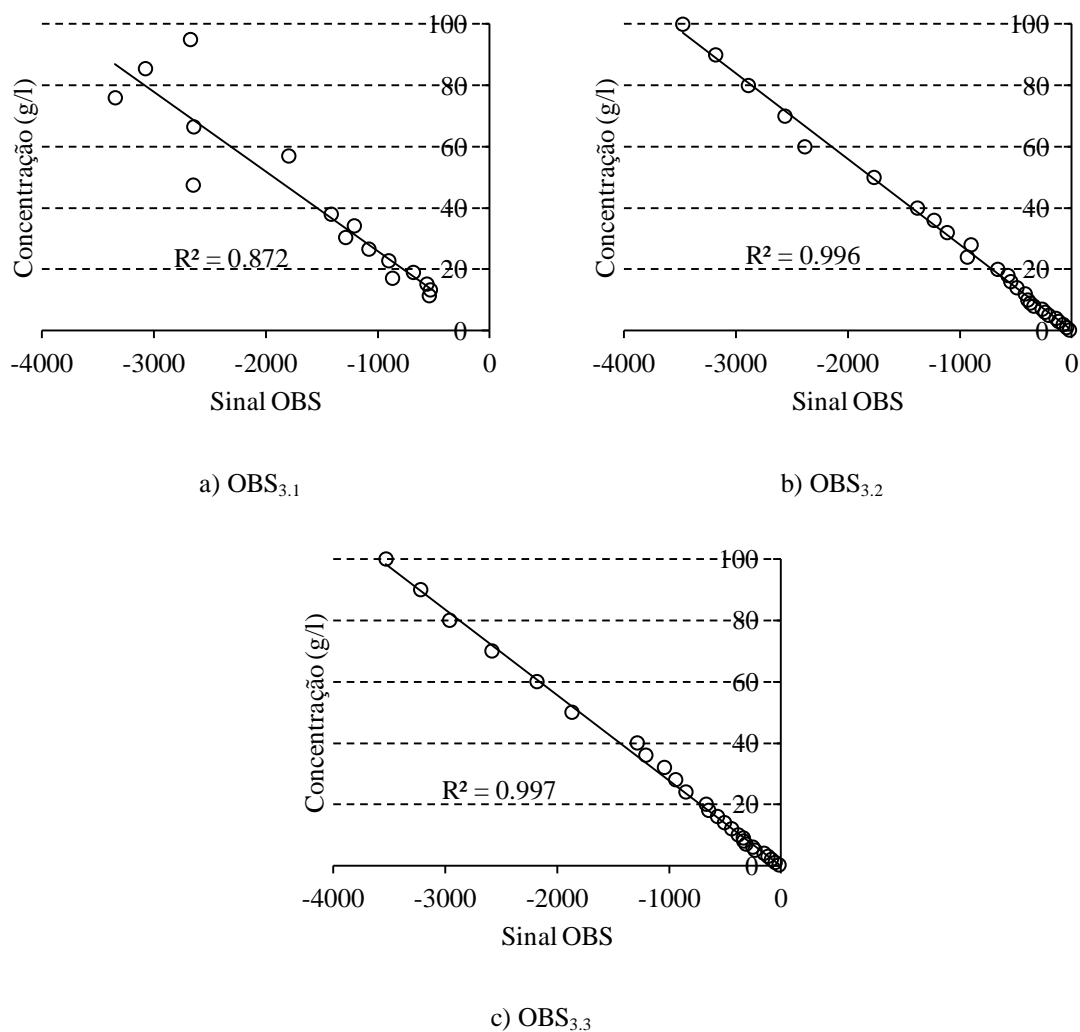


Figura 5.8 – Calibração dos OBS usados durante a 3ª campanha de campo.

De acordo com a Figura 5.8, estabeleceram-se as equações 5.5, 5.6 e 5.7, correspondentes aos 3 OBS utilizados na 3ª campanha.

$$C_{3,1} = -0.0260 s_{3,1} - 0.1309; \quad (5.5)$$

$$C_{3,2} = -0.0280 s_{3,2}; \quad (5.6)$$

$$C_{3,3} = -0.0279 s_{3,3}; \quad (5.7)$$

5.2.2. Concentrações medidas no campo

Como referido anteriormente, a caracterização da quantidade de sedimentos em suspensão com a ajuda dos OBS, foi feita na 1^a e 3^a campanhas. Nesta dissertação serão apresentados somente os resultados obtidos para a 3^a campanha.

Os sensores de concentração debitam valores em milivolts (mV). A estes valores aplicaram-se as equações obtidas na calibração, de modo a converter os sinais em gramas por litro (g/l). Os resultados estão ilustrados na Figura 5.9.

Devido ao nível acima da areia a que estavam colocados (Tabela 2.4), os sensores não começaram a registar todos no mesmo instante. O OBS_{3,2} foi o que começou a registar em primeiro lugar, sendo o que se encontrava a menor altura (Figura 5.9b), seguido do OBS_{3,3}, Figura 5.9c e posteriormente do OBS_{3,1}, o mais distante do fundo, cujos dados correspondem à Figura 5.9a. Outro aspeto a realçar é a inexistência de dados num dado intervalo de tempo, devido a um eventual problema técnico dos aparelhos.

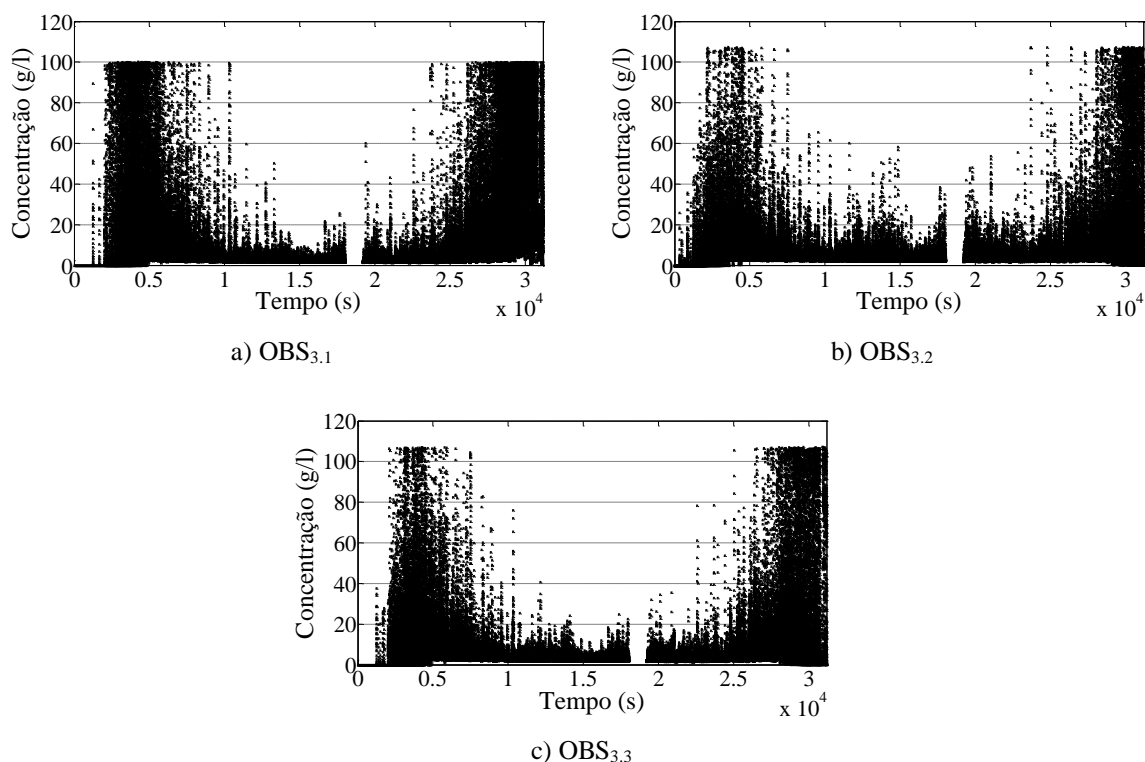


Figura 5.9 – Concentrações de sedimentos em suspensão ao longo do período de medições, na 3^a campanha.

A todos os níveis de medição, a concentração de sedimentos em suspensão é superior na fase inicial e final dos registos, onde se identificam picos de cerca de 110 g/l para os OBS_{3,2} e OBS_{3,3}, e de 100 g/l para o OBS_{3,1}. Embora o OBS_{3,1} atinja picos inferiores aos restantes, estes ocorrem com maior frequência, pelo que existe uma maior densidade de pontos na figura correspondente. Este aspeto irá influenciar a análise das médias em intervalos de 10 minutos, nos quais o OBS_{3,1} atingirá valores superiores em relação aos outros aparelhos.

5.2.3. Concentrações vs altura de onda vs altura da coluna de água

Após uma primeira análise, foram estabelecidos intervalos de tempo de 10 minutos, para os quais se fez a média de valores de concentração, altura de onda e altura da coluna de água (Figuras 5.10 e 5.11).

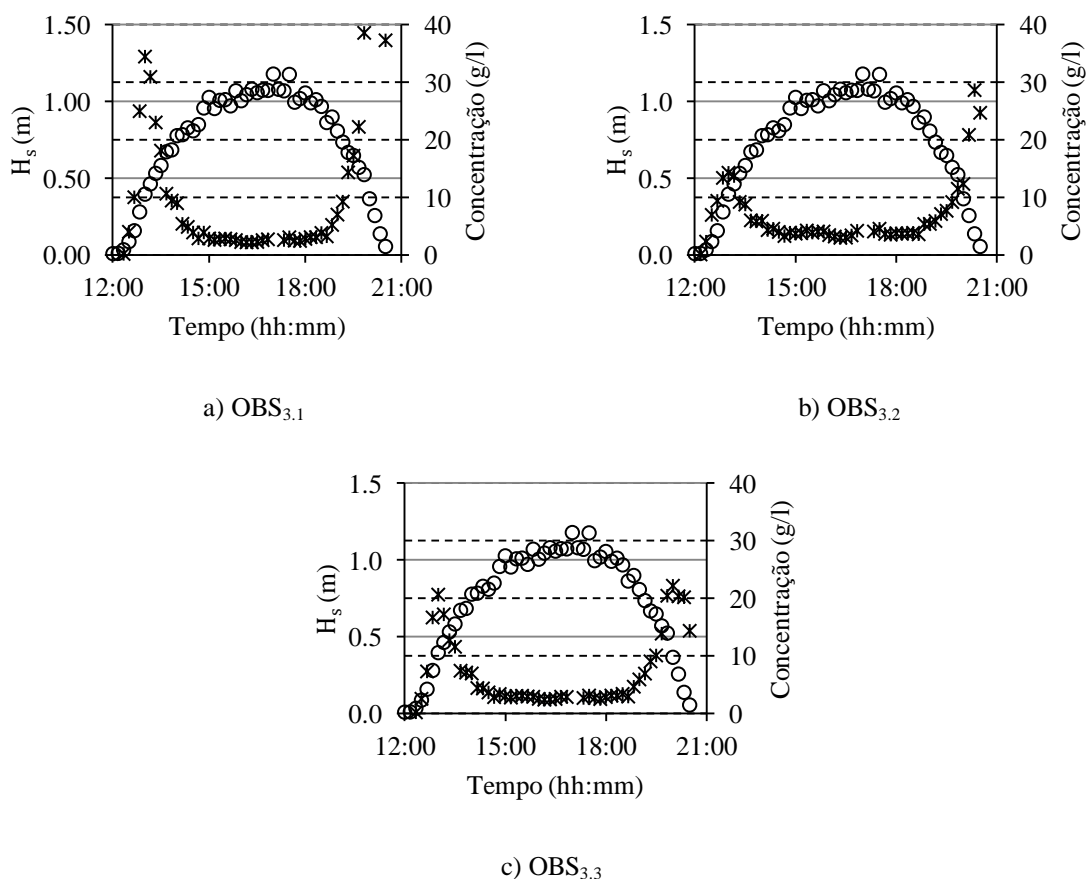


Figura 5.10 – Altura significativa das ondas (°) e concentrações (*) ao longo do tempo.

Na Figura 5.10 verifica-se um aumento da concentração de sedimentos em suspensão, em todos os sensores, desde o início dos registos até às 13:00h. Segue-se um decréscimo dos valores da concentração, que no OBS_{3,2} se verifica até às 14:00h, no OBS_{3,3} até às 14:30h e no OBS_{3,1} até às 14:40h. Após o decréscimo, os instrumentos passam a registar valores aproximadamente constantes, 2.75 g/l para o OBS_{3,1}, 3.81 g/l para o OBS_{3,2} e 2.90 g/l para o OBS_{3,3}, em média, ao longo do tempo. Por fim, assinala-se um novo aumento dos valores da concentração, sendo que para o sensor que se encontra a menor distância da areia (OBS_{3,2}), este crescimento vai desde as 18:50h até às 20:20h. Por sua vez, as concentrações registadas pelos OBS_{3,1} e OBS_{3,3} aumentam entre as 18:40h e as 20:10h e entre as 18:40h e as 20:00h, respetivamente.

Para pequenas profundidades, existe uma variabilidade grande nos valores da concentração observada. Na Figura 5.11 mostram-se as diferentes profundidades a que cada sensor se encontrava na 3ª campanha, percebendo-se a variação das concentrações

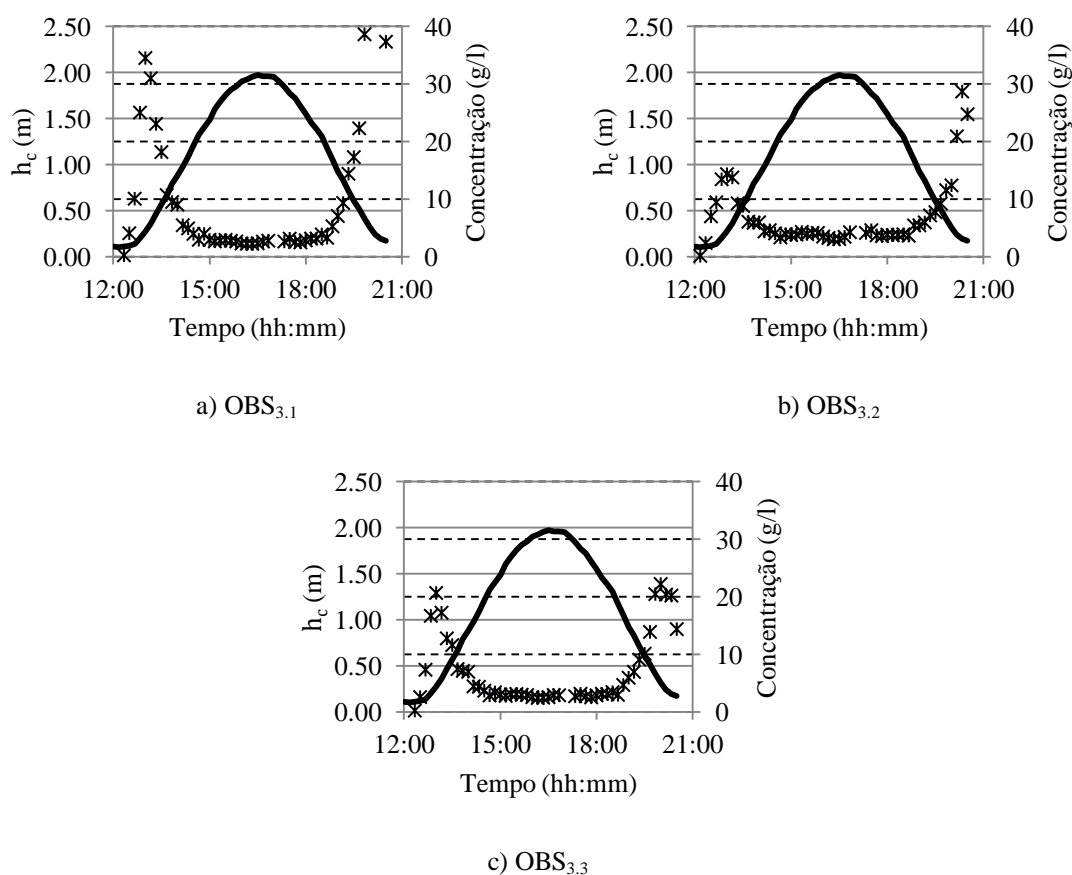


Figura 5.11 – Altura da coluna de água (-) e concentrações (*) ao longo do tempo.

Durante a enchente, os sensores estiveram inicialmente na zona de espraçamento, passando para a zona de transição, posteriormente para a zona de rebentação, e em preia-mar, antes da zona de rebentação. Após, durante a fase da maré de vazante, este trajeto os aparelhos retornaram à zona de rebentação, seguida da zona de transição e por fim entraram novamente na zona de espraçamento. Estabelecida a identificação das zonas, salienta-se que as concentrações mais elevadas inserem-se na zona de espraçamento, o que vai ao encontro de Masselink e Puleo (2006), que referem a existência de uma maior quantidade de sedimentos em suspensão nesta zona, quando comparada com a zona de rebentação.

Beach e Sternberg (1996) verificaram que as concentrações aumentam com a aproximação do fundo, mas que ao aproximar-se da costa esse efeito não é tão patente. Esta teoria também se enquadra nos resultados obtidos durante o período de realização das campanhas, pois ao analisar os gráficos da Figura 5.11 verifica-se que, na zona onde se atingem maiores profundidades, os OBS que se encontram a uma distância menor da superfície de areia obtêm maiores concentrações do que aqueles que se encontram a uma maior distância do fundo. Já nos intervalos em que as profundidades são mais baixas, registam-se concentrações mais elevadas nos aparelhos que se encontram a alturas superiores. Este aspeto está patente quando se faz uma comparação entre o OBS_{3,1} e o OBS_{3,2}, pois na zona de espraçamento, as maiores concentrações médias são registadas pelo OBS_{3,1}, enquanto na zona de rebentação o OBS_{3,2} regista maiores valores.

Capítulo 6

Transporte sedimentar

Capítulo 6 Transporte sedimentar

6.1. Descrição dos processos

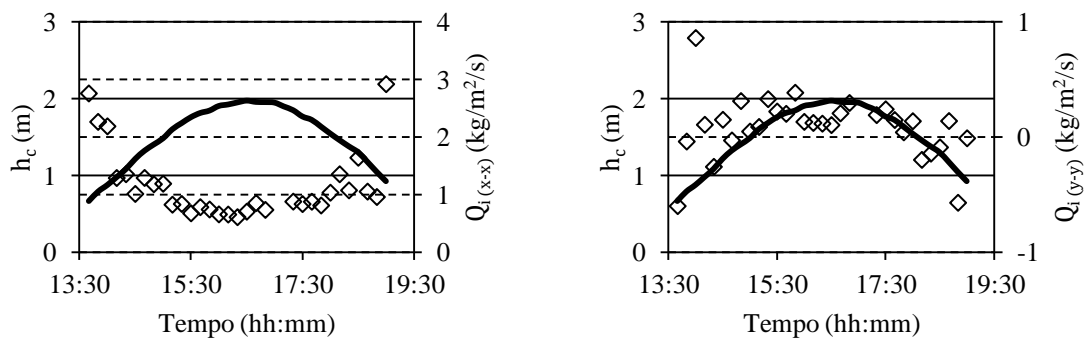
De uma forma geral, os fatores que influenciam o transporte de sedimentos ao longo da costa são as ondas, as correntes, a dimensão dos sedimentos, a declividade do fundo e a intensidade e direção do vento (Davis, 1985). Segundo Bayram *et al.* (2001), é na zona de rebentação, que o transporte longitudinal apresenta maior intensidade, pois é onde as correntes longitudinais induzidas pelas ondas predominam. Referindo os mesmos autores, também se observa este fenómeno na zona de espraçamento da onda, sendo que nesta zona há uma maior relevância aos processos de transporte sedimentar transversal (Erikson *et al.*, 2005). O transporte longitudinal dá-se por suspensão, onde os sedimentos são transportados acima do fundo oceânico devido aos remoinhos turbulentos de água, e junto ao fundo, onde os sedimentos permanecem perto do leito oceânico, rolando e saltando ao longo deste (Rosati *et al.*, 2002a). Oliveira *et al.* (2012) mencionam, que a concentração de sedimentos em suspensão, na zona de rebentação, é um parâmetro fundamental para quantificar o transporte longitudinal total. Neste capítulo é apresentado inicialmente uma estimativa do transporte sólido em suspensão que ocorreu no trecho em análise, para a 3^a campanha, com base nos dados dos OBS e ECM.

Posteriormente, serão apresentadas estimativas do transporte sólido longitudinal com recurso à modelação e às fórmulas empíricas que tentam avaliar o potencial de transporte, permitindo uma comparação entre todos os resultados.

6.2. Caudais sólidos medidos na 3^a campanha

6.2.1. Caudais instantâneos ao longo do tempo

Numa primeira análise, estimou-se o caudal que passa num ponto num dado instante de tempo com base nas medições das velocidades ($ECM_{3,1}$) e das concentrações de sedimentos em suspensão registadas no $OBS_{3,3}$, porque se encontravam no mesmo nível. De seguida, calcularam-se médias de 10 minutos e compararam-se os valores obtidos ao longo do tempo em função da coluna de água. Os resultados estão ilustrados na Figura 6.1.



a) Componente longitudinal.

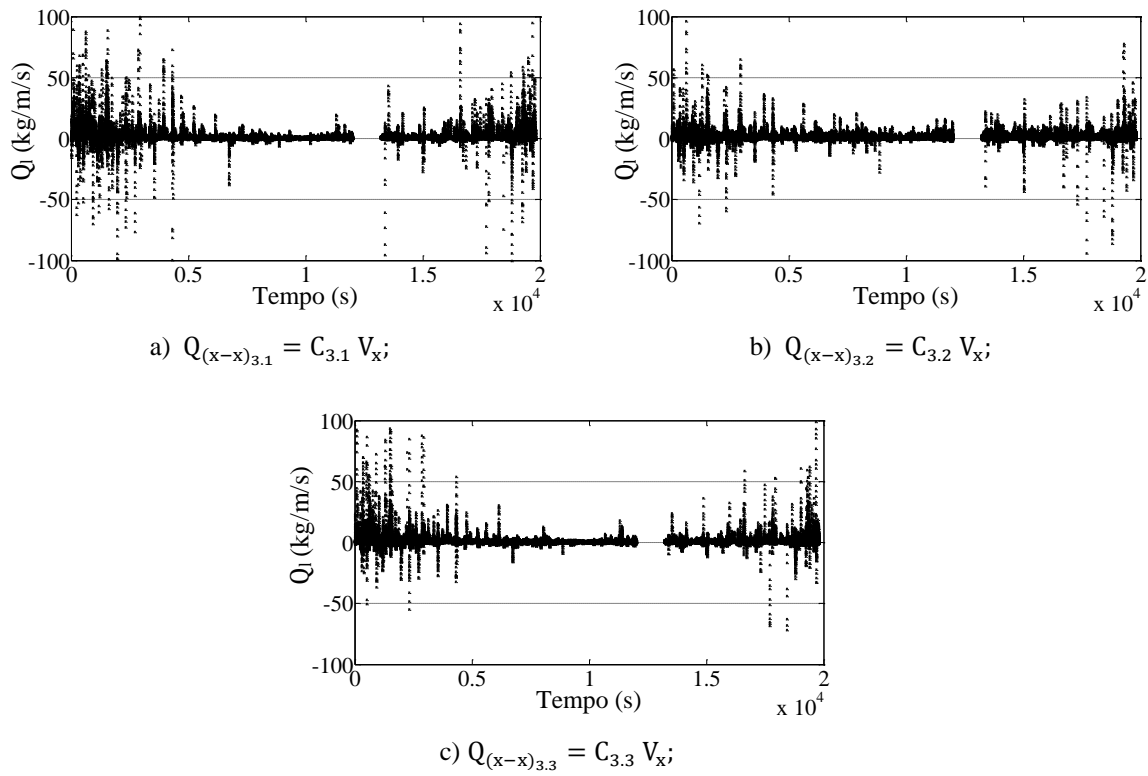
b) Componente transversal.

Figura 6.1 – Média a cada 10 minutos, do caudal instantâneo em função da profundidade ao longo do período de aquisição de dados do ECM_{3,1}.

Na direção longitudinal observam-se caudais de transporte variáveis, mas sempre positivos (Norte – Sul), delineando-se um intervalo entre as 13:30h e as 14:00h em que a quantidade de sedimentos transportados decresce. A partir das 15:10h até às 18:00h os caudais registados têm valores semelhantes, oscilando entre 0.61 kg/m²/s e o 1.04 kg/m²/s. Posteriormente, os caudais têm uma tendência crescente até ao fim dos registos, atingindo valores semelhantes aos iniciais. Para a componente transversal à costa observou-se uma predominância de valores positivos, sugerindo um transporte no sentido da costa. Este aspeto difere do comportamento de V_y , que para médias de 10 minutos, tem o sentido contrário à costa (Figura 5.6). Esta observação sugere que, a quantidade de sedimentos em suspensão para registos de velocidades no sentido da costa foi maior em relação às concentrações registadas para velocidades com sentido contrário à costa. Observa-se também que para profundidades reduzidas o transporte dá-se maioritariamente no sentido contrário à costa, enquanto para profundidades maiores o transporte é no sentido da costa.

6.2.2. Estimativa do transporte sedimentar na 3ª campanha

Após análise dos caudais instantâneos, calculou-se o caudal sólido por unidade de largura. Numa primeira fase esses valores foram estimados, considerando uma velocidade constante na vertical da coluna de água e as diferentes concentrações registadas pelos três OBS utilizados, tal como é ilustrado nas Figuras 6.2 e 6.3.

Figura 6.2 – Caudal sólido longitudinal (Q_l).

A Figura 6.2, onde se ilustram os caudais sólidos longitudinais, indica que o sentido predominante da deriva litoral é de Norte para Sul, facto evidenciado pelas médias dos registos, que variam entre 1.15 kg/m/s e 1.43 kg/m/s, para os diferentes níveis dos OBS. A análise feita em 5.1.2 indica que a velocidade longitudinal não variou consideravelmente ao longo da campanha, enquanto na secção 5.2.2 verificou-se que as concentrações registadas pelo OBS_{3.1} atingiram valores mais elevados, no início e fim da campanha, o que possivelmente levou a picos mais elevados para $Q_{(x-x)_{3.1}}$. Para $Q_{(x-x)_{3.2}}$ obtiveram-se caudais mais uniformes no tempo, traduzindo-se numa média superior aos restantes, 1.32 kg/m/s.

Na Figura 6.3 são apresentados os resultados para o transporte transversal.

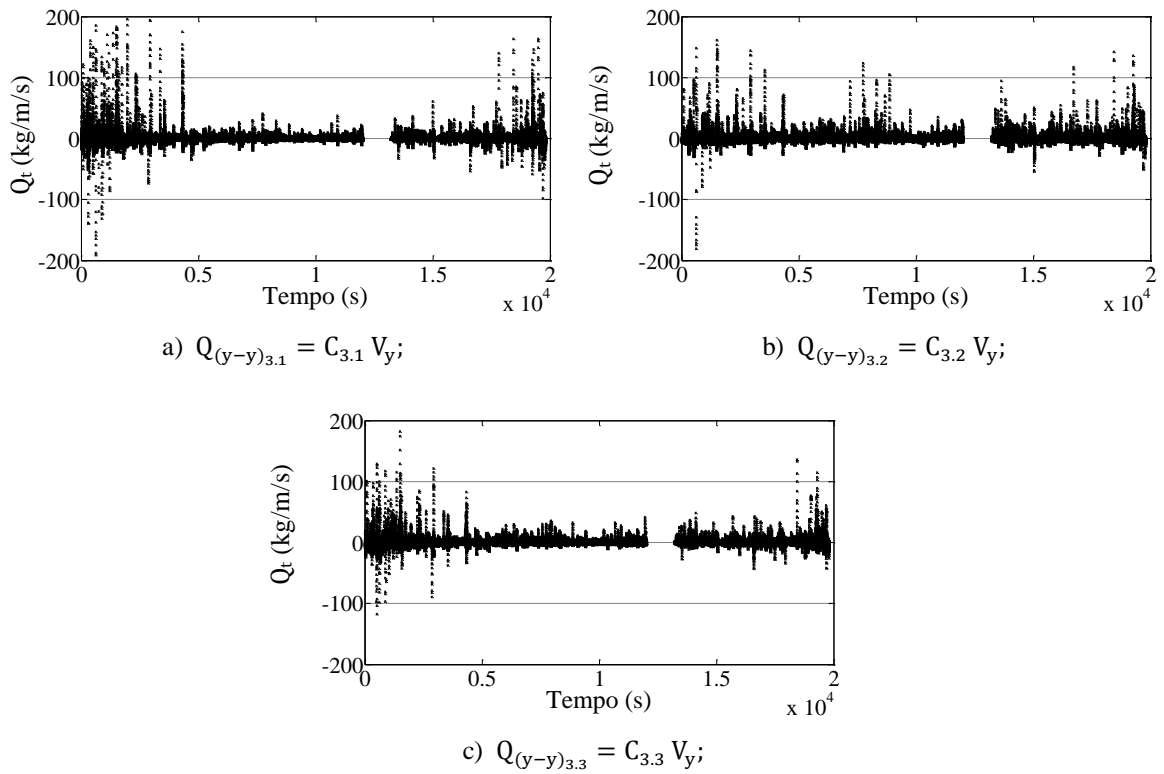


Figura 6.3 – Caudal sólido transversal (Q_t).

Os valores médios são iguais a 0.14 kg/m/s para o $Q_{(y-y)3.1}$, -0.20 kg/m/s para o $Q_{(y-y)3.2}$ e 0.07 kg/m/s para o $Q_{(y-y)3.3}$. Tendo em conta a altura a que os OBS estavam dispostos no tripé, possivelmente o refluxo da onda teve maior influência no sentido indicado pela média do $Q_{(y-y)3.2}$. Destaca-se ainda que, os picos registados com sentido contrário à costa, foram inferiores aos registados no sentido da praia, sendo os de maior valor registados com recurso às concentrações do OBS_{3.1}.

Numa segunda fase, o caudal sólido foi calculado considerando, para cada OBS, uma altura de influência (Figura 6.4).

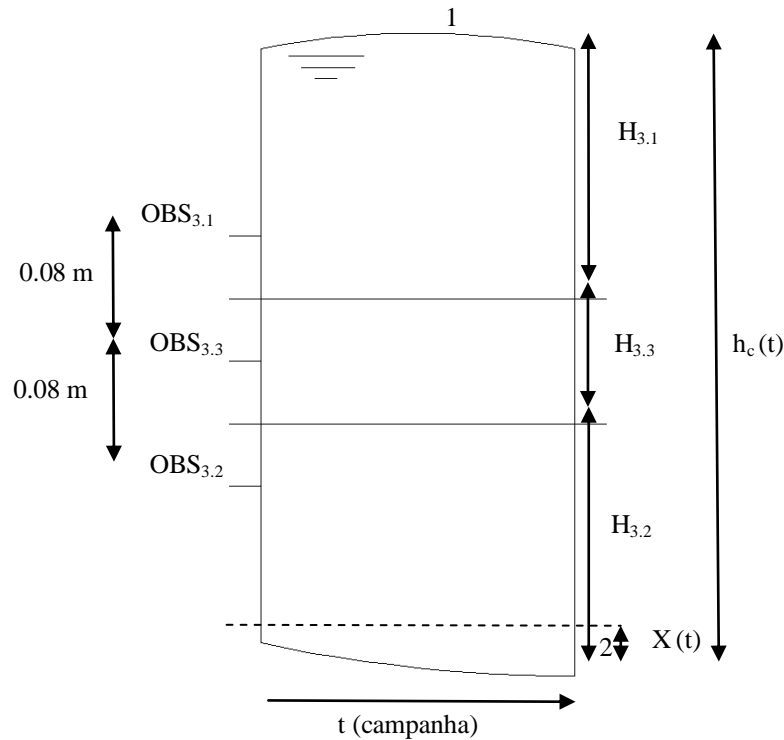


Figura 6.4 – Alturas de influência dos OBS. 1. Nível da superfície da água; 2. Nível da areia.

Para caracterizar a altura de influência de cada OBS, teve-se em conta a distância entre aparelhos, e a variação da altura da coluna de água (h_c) e da superfície de areia (X) ao longo do tempo da campanha. Para o OBS_{3.2}, estabeleceu-se uma altura de influência em função da variação da superfície de areia ($H_{3.2}$). O OBS_{3.3} manteve a altura de influência constante, durante o período de realização da campanha ($H_{3.3}$). Por fim, para obter a altura de influência do OBS_{3.1} ($H_{3.1}$), subtraiu-se ao h_c as alturas de influência dos outros dois aparelhos, ao longo do tempo (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Altura de influência de cada OBS, ao longo do tempo (t).

OBS	Altura de influência (m)
OBS _{3.1}	$H_{3.1} = h_c(t) - (H_{3.2} + H_{3.3})$
OBS _{3.2}	$H_{3.2} = 0.04 + X(t)$
OBS _{3.3}	$H_{3.3} = 0.08$

A Figura 6.5 representa a estimativa do caudal sólido na direção longitudinal ao longo do tempo, calculado tendo em conta as diferentes concentrações de sedimentos em suspensão registadas em cada OBS, e as alturas de influência consideradas para cada um dos sensores.

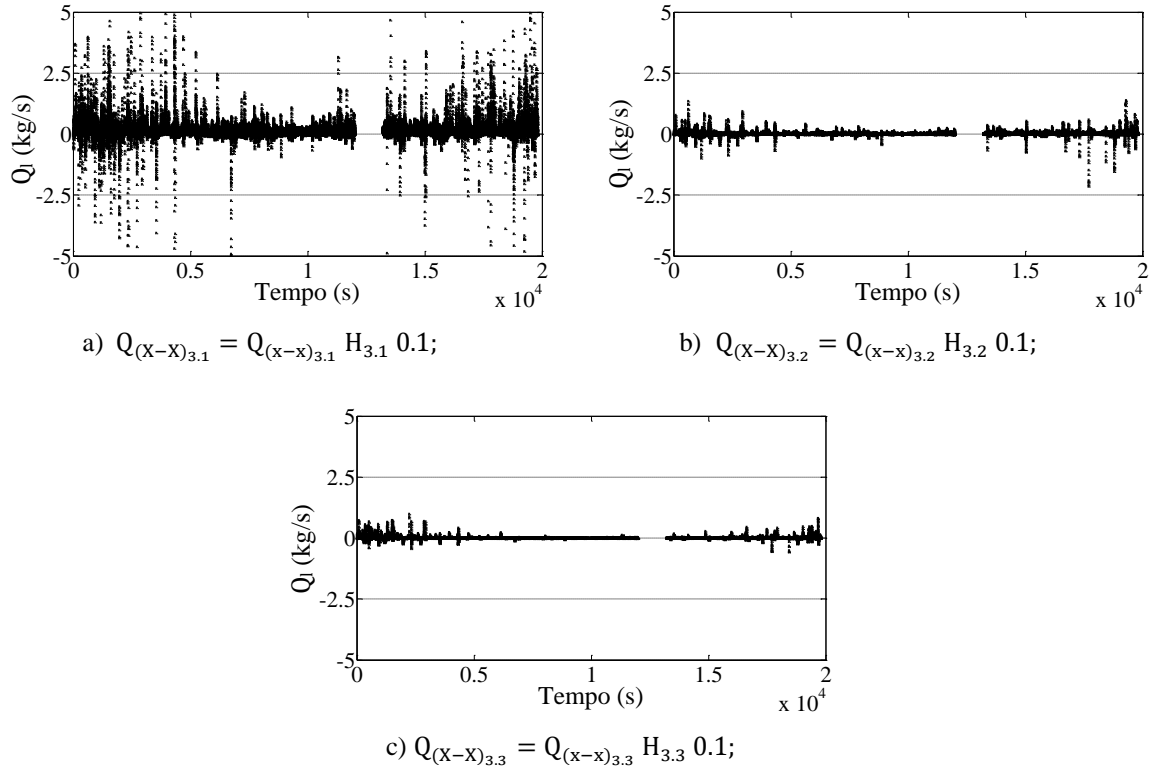


Figura 6.5 – Caudal sólido longitudinal (Q_l), consoante as diferentes alturas de influência dos OBS.

A estimativa do caudal sólido longitudinal total foi calculada através da soma dos valores apresentados nos gráficos da Figura 6.5, considerando tempos de integração de 0.1 segundos, ao longo do tempo total dos registos da campanha, considerado igual a 5 horas e 10 minutos (t_c).

$$Q_{l_{3.1}} = \sum Q_{(X-X)_{3.1}} = 2.29 \times 10^4 \text{ (kg}/t_c\text{)};$$

$$Q_{l_{3.2}} = \sum Q_{(X-X)_{3.2}} = 0.38 \times 10^4 \text{ (kg}/t_c\text{)};$$

$$Q_{l_{3.3}} = \sum Q_{(X-X)_{3.3}} = 0.17 \times 10^4 \text{ (kg}/t_c\text{)};$$

$$Q_1 = Q_{13,1} + Q_{13,2} + Q_{13,3} = 2.85 \times 10^4 \text{ (kg/t}_c\text{)};$$

O resultado do transporte sedimentar é expresso em kg/t_c, pelo que a transformação de massa para volumes obriga à divisão por (1-n) (ρ_s-ρ). Na expressão, n é a porosidade dos sedimentos (n=0.4); ρ_s é a massa volúmica do material do fundo, normalmente admitida igual a 2650 kg/m³ e ρ é a massa volúmica de água, igual a 1027 kg/m³.

A soma dos valores dos diferentes caudais (Q₁) indica que Q_{13,1}, devido às maiores alturas de influência do OBS_{3,1}, influenciou cerca de 80% do transporte longitudinal total (cenário A). Perante este resultado optou-se por fazer uma estimativa, por defeito, assumindo unicamente os valores de Q_{13,2} e Q_{13,3}, e desprezando o contributo da parte superior da coluna de água, partindo do pressuposto que as concentrações de sedimentos em suspensão se aproximam de zero, sendo identificada na Tabela 6.2 por cenário B. Nos dois cenários foi considerado, que durante um ano, o clima de agitação permaneceu semelhante ao dia de realização da campanha de campo. Os valores obtidos indicam um caudal 5 vezes inferior para o cenário B, em relação ao cenário A.

Tabela 6.2 – Caudal sólido longitudinal, Q₁.

Cenário	Q ₁ (x10 ⁴ kg/tc)	Q ₁ (kg/s)	Q ₁ (x10 ⁷ kg/ano)	Q ₁ (x10 ⁴ m ³ /ano/m)
A	2.85	1.53	4.83	4.96
B	0.55	0.3	0.93	0.96

A dificuldade de conduzir trabalhos de campo para medição da distribuição transversal do transporte sólido longitudinal tem sido, segundo Coelho (2005), um obstáculo à determinação de quaisquer resultados. No entanto, Wang *et al.* (2002) referem que a distribuição do transporte sólido longitudinal, ao longo da largura ativa do perfil não é uniforme. Coelho (2005) refere ainda que, esta distribuição é muito diferente para situações de diferente tipo de rebentação da ondulação, concluindo que a zona junto à praia é sempre uma região de transporte significativo, mas no caso de ondas mergulhantes (tipo de rebentação presenciada durante a 3^a campanha de campo) existe um pico de concentração da distribuição transversal na zona da rebentação das ondas. Assim, como os sensores estiveram a maior parte do tempo na zona de rebentação, os valores estimados para a 3^a

campanha, possivelmente contribuíram significativamente para o transporte total no perfil ativo, embora haja outros fatores que podem contrariar esta ideia, nomeadamente a exclusão, nas medições, do transporte que se dá junto ao fundo, contabilizando unicamente o transporte sólido em suspensão, e o clima de agitação, que durante a 3ª campanha foi pouco energético.

Seguindo o mesmo processo de análise para a direção transversal, os gráficos da Figura 6.6 representam o caudal sólido transportado na direção perpendicular à linha de costa, consoante as diferentes concentrações de sedimentos em suspensão registadas pelos OBS e as respetivas alturas de influência.

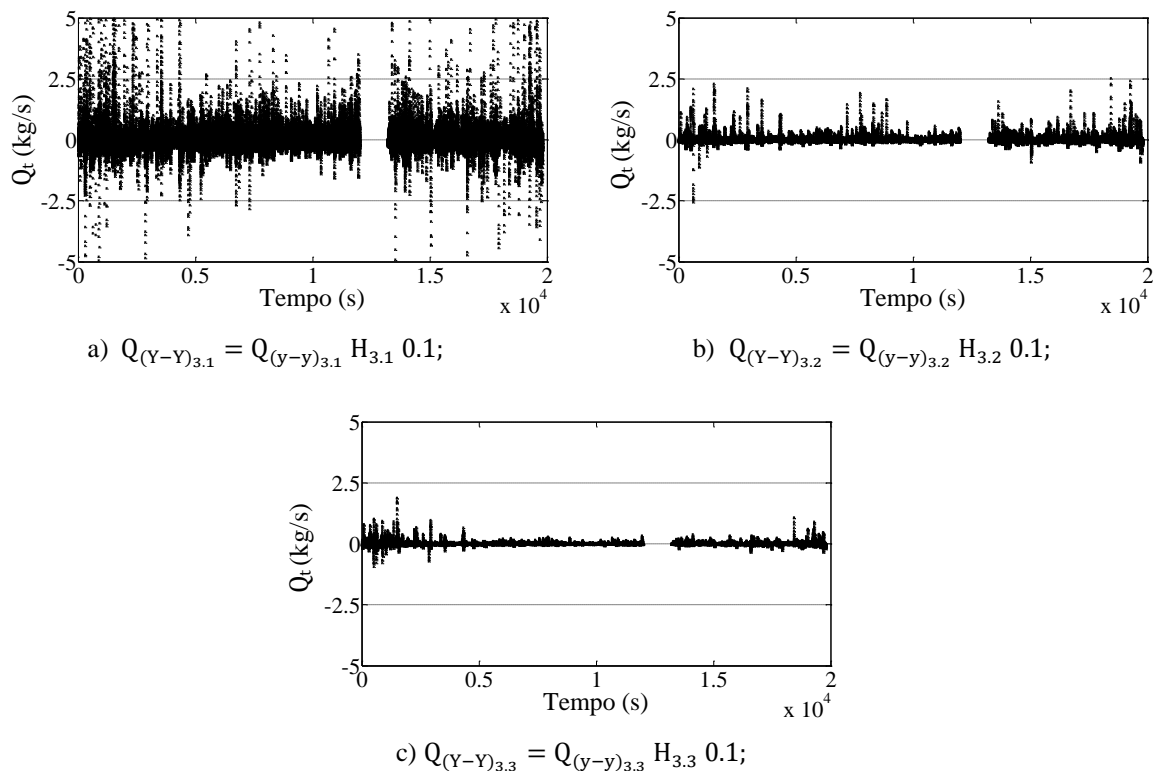


Figura 6.6 – Caudal sólido transversal (Q_t), consoante as diferentes alturas de influência dos OBS.

A estimativa do caudal sólido transversal ao longo da campanha foi calculada através da soma dos valores apresentados nos gráficos, para o mesmo período utilizado na análise do caudal sólido longitudinal.

$$Q_{t_{3.1}} = \sum Q_{(Y-Y)_{3.1}} = 3.78 \times 10^3 \text{ (kg/t}_c\text{)};$$

$$Q_{t_{3.2}} = \sum Q_{(Y-Y)_{3.2}} = 0.34 \times 10^3 \text{ (kg/t}_c\text{)};$$

$$Q_{t_{3.3}} = \sum Q_{(Y-Y)_{3.3}} = 0.12 \times 10^3 \text{ (kg/t}_c\text{)};$$

$$Q_t = Q_{t_{3.1}} + Q_{t_{3.2}} + Q_{t_{3.3}} = 4.00 \times 10^3 \text{ (kg/t}_c\text{)};$$

Para o caudal transversal, $Q_{t_{3.1}}$ é o que tem maior contribuição para a estimativa final, novamente por efeito da altura da coluna de água acima do OBS_{3.1}, que como já foi referido representa um valor superior às estabelecidas para os demais OBS. Considerando o total de valores, estabelece-se um caudal transversal de 4000 kg durante a campanha de campo, o que representa cerca de 0.215 kg/s. Analogamente ao procedimento referido para o caudal longitudinal, o valor obtido, excluindo o $Q_{t_{3.1}}$, é de 0.025 kg/s, ou seja, cerca de 8 vezes inferior. Esta segunda estimativa é mais realista, porque a concentração de sedimentos em suspensão na parte superior da coluna de água, à medida que a profundidade aumenta, é mais próxima de zero do que da concentração medida no OBS_{3.1}.

6.3. Transporte sólido longitudinal, através do GENESIS

O GENESIS é um modelo que têm vindo a ser aplicado em inúmeros casos de estudo (Sena, 2010 e Kaczowski e Kana, 2012). Para além de propagar as ondas desde a profundidade de fecho até à costa, o GENESIS possibilita uma estimativa do caudal sólido longitudinal transportado para um dado período de tempo. O volume de sedimentos dado pelo GENESIS é calculado através da equação 6.1.

$$Q_s = (H^2 C_g)_b \left(a_1 \sin 2\alpha_b - a_2 \cos \alpha_b \frac{\partial H}{\partial X} \right)_b ; \quad (6.1)$$

Nesta equação C_g é a velocidade do grupo de ondas dada pela teoria linear das ondas (m/s). O índice b denomina a zona de rebentação. As restantes variáveis já foram definidas anteriormente, sendo os parâmetros adimensionais a_1 e a_2 definidos pelas equações 6.2 e 6.3.

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho}{\rho_s} - 1 \right) (1 - n) (1.416)^{5/2}}; \quad (6.2)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho}{\rho_s} - 1 \right) (1 - n) m (1.416)^{7/2}}; \quad (6.3)$$

Nas equações 6.2 e 6.3, os coeficientes empíricos K_1 e K_2 são designados por parâmetros de transporte, sendo usados para calibração do modelo. Os valores de K_1 e K_2 são estimados de forma empírica sendo que K_1 é responsável pela magnitude da taxa do transporte sólido longitudinal. Segundo Gravens *et al.* (1991), o valor de K_2 varia entre $0.5K_1$ e $1K_1$, não sendo recomendado que K_2 tome valores superiores ao máximo apresentado.

O primeiro termo da equação 6.1, $(H^2 C_g)_b (a_1 \sin 2\alpha_b)_b$ corresponde à fórmula de *Coastal Engineering Reserarch Center* (CERC), descrita na secção 6.4 desta dissertação.

O segundo termo da equação 6.1, $(H^2 C_g)_b \left(a_2 \cos \alpha_b \frac{\partial H}{\partial X} \right)_b$ não faz parte da fórmula de CERC, sendo uma parcela que descreve o efeito do gradiente da altura de onda na rebentação $\left(\frac{\partial H}{\partial X} \right)$.

O transporte longitudinal sólido quantificado pelo GENESIS é devido única e exclusivamente a ondas e correntes induzidas pelas ondas, e varia consoante o ângulo na rebentação, calculado com base na lei de *Snell* (equação 3.8).

Para dar início à simulação no modelo foram necessários 3 ficheiros: ficheiro de domínio espacial, ficheiro de armazenamento do espectro de agitação nas estações e um ficheiro de registos cronológicos de ondas. O primeiro ficheiro contém informações sobre as características do terreno no local de estudo, o segundo foi originado aquando simulação do modelo STWAVE, dando informações referentes aos parâmetros das ondas na profundidade de fecho e o 3º ficheiro estabelece o tempo para o qual um dado clima de agitação aconteceu.

Definiu-se que o tempo de simulação seria de um dia, período de duração da 3ª campanha. É importante referir que a simulação foi feita para as 4 ondas caraterísticas definidas

anteriormente, sendo a estimativa final resultado das frequências de ocorrência dessas mesmas ondas.

A caracterização e avaliação dos sedimentos transportados, é uma análise fundamental num estudo que pretende compreender a capacidade de transporte sólido longitudinal e a consequente deriva litoral. O modelo GENESIS utiliza como dado de entrada o diâmetro característico dos sedimentos, que para este estudo foi considerado como 0.89 mm, fruto da análise granulométrica feita anteriormente (Secção 2.3.4 – Figura 2.5 – 3ª campanha).

A profundidade de fecho é outro parâmetro que se tem de definir no modelo. Na bibliografia existem soluções analíticas que visam estabelecer um valor para a profundidade a partir da qual o perfil da praia não sofre modificações significativas. Entre as propostas destacam-se Hallermeier (1978) e Birkemeier (1985). Os valores intervenientes nestas expressões baseiam-se em estudos do regime de agitação marítima anual. Uma vez que para esta dissertação não foi possível aceder a uma base alargada de dados, estabeleceu-se um valor de 12 metros para a profundidade de fecho, sendo um valor consensual na bibliografia (Coelho, 2005). Para a cota da berma da praia o valor estabelecido foi de 4 metros, referido ao nível médio das águas do mar. Este valor foi confirmado através do estudo levado a cabo por Teixeira (2006).

K_1 e K_2 foram considerados iguais, sendo obtidos pela proposta de Valle *et al.* (1993), que consiste na expressão empírica 6.4, que relaciona o valor de K com o diâmetro médio dos sedimentos. O valor obtido foi de 0.15.

$$K_1 = K_2 = 1.4 e^{-2.5 d_{50}}; \quad (6.4)$$

Após simulação das diferentes ondas consideradas, os resultados são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Caudal longitudinal obtido após modelação no GENESIS.

Onda	Q_s (m ³ /dia)	Q_s (m ³ /ano)	Ocorrências	Q_s (m ³ /ano)
1	451	164615	2.80%	4605
2	295	107675	11.19%	12048
3	825	301125	9.09%	27375
4	698	254770	76.92%	195977
			Total	240000

De acordo com a Tabela 6.3, o caudal longitudinal transportado durante um ano para o clima de agitação característico da 3ª campanha seria de 24.0×10^4 m³/ano, sendo as ondas com alturas superiores as que apresentam maior capacidade de transporte. Ao contrário da estimativa obtida com recurso aos dados de campo, o resultado do GENESIS traduz o transporte sólido longitudinal, relacionado com toda a largura ativa do perfil, definida pela profundidade de fecho. A estimativa final do GENESIS considera ainda, as componentes em suspensão e junto ao fundo, enquanto o valor obtido em campo, corresponde unicamente aos sedimentos em suspensão.

6.4. Transporte sólido longitudinal, através de formulações empíricas

6.4.1. Fórmulas identificadas

Nesta seção serão apresentadas fórmulas distintas que permitem estimar o transporte sólido longitudinal num dado trecho. Em geral, a avaliação do potencial de transporte de sedimentos relaciona o volume de sedimentos em transporte, com poucos parâmetros de ondas e da praia, o que origina incertezas nos resultados (Coelho, 2005). Estas fórmulas permitem o cálculo do potencial de transporte sólido longitudinal, sendo o resultado uma relação do volume de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa em determinada unidade de tempo.

As duas primeiras formulações apresentadas, CERC pela expressão 6.5 e Bayram através da expressão 6.6, têm em comum um coeficiente empírico (K) que serve para calibrar os resultados. Este parâmetro, diferente nas duas expressões, varia consoante o autor, assumindo valores concretos em Bodge e Kraus (1991), Schoonees e Theron (1993) e Rosati

et al. (2002b), ou sendo obtido através de equações que relacionam tanto características da onda, como da praia, como sugerem Valle *et al.* (1993) e Mil-homens *et al.* (2013).

$$Q_s = K_{CERC} \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16 k_b^{\frac{1}{2}} (\rho_s - \rho) (1 - n)} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2 \alpha_b); \quad (6.5)$$

$$Q_s = K_{Bayram} \left(\frac{F V}{(\rho_s - \rho) (1 - n) g w_s} \right); \quad (6.6)$$

Nas expressões 6.5 e 6.6, para além dos parâmetros já identificados, k_b é o índice de rebentação, V representa a velocidade média da corrente longitudinal que atua na zona de rebentação, w_s é a velocidade de queda dos sedimentos e F é a quantidade de sedimentos em suspensão.

Kamphuis *et al.* (1986) apresentaram uma expressão empírica que tem em conta a inclinação dos fundos e a dimensão dos sedimentos, traduzindo-se na expressão 6.7.

$$Q_s = 1.28 \frac{H_b^{3.5} m}{d_{50}} \sin(2 \alpha_b); \quad (6.7)$$

Nesta equação, m representa a inclinação da praia, enquanto as restantes grandezas têm o significado já referido.

Baseado numa série de estudos de laboratório, Kamphuis (1991), sugeriu uma fórmula empírica para avaliação do potencial do transporte sólido, modificando a expressão anteriormente referida, acrescentando-lhe a influência do período de pico da onda, T_p .

$$Q_s = 64000 H_b^2 T_p^{1.5} m^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin(2 \alpha_b)^{0.6}; \quad (6.8)$$

Finalmente Schoonees e Theron (1996), em função de um extenso conjunto de dados fizeram a recalibração da fórmula de Kamphuis (1991), mas com a diferença de usarem somente dados de campo, deixando os dados de laboratório, visto que estes contêm efeitos de escala ou utilizam apenas ondas regulares. Finalizado o processo de recalibração, considera-se a equação 6.9 como sendo uma das melhores a avaliar o transporte de sedimentos longitudinal, visto que tem em conta a ação das ondas reais através dos

parâmetros H_b e T_p (Araújo e Alfredini, 2001). Fórmula de Kamphuis aprimorada por Schoonees e Theron (1996):

$$Q_s = 99000 H_b^2 T_p^{1.5} m^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin(2 \alpha_b)^{0.6}; \quad (6.9)$$

Já Mil-homens *et al.* (2013) sugerem uma versão mais recente da fórmula de Kamphuis, através da equação 6.10.

$$Q_s = 17.5 H_b^{2.75} T_p^{0.89} m^{0.86} d_{50}^{-0.69} \sin(2 \alpha_b)^{0.5}; \quad (6.10)$$

6.4.2. Resultados obtidos na 3ª campanha

Com o objetivo de estimar o caudal sólido transportado longitudinalmente na zona de estudo, recorreu-se às expressões 6.5 e 6.7. A escolha destas fórmulas relaciona-se com os dados adquiridos, tanto na campanha de campo, como após as simulações realizadas no modelo de propagação de ondas, permitindo a utilização de todos os parâmetros requeridos pelas equações.

A fórmula de CERC e de Kamphuis têm parâmetros em comum, a altura e o ângulo da onda na zona de rebentação, H_b e α_b respetivamente. Os valores usados advêm da divisão da agitação feita no capítulo 4, sendo estes referentes às características da onda na zona de rebentação (Figuras 4.5 e 4.6). O índice de rebentação (k_b) utilizado provém da relação entre a profundidade e a altura de onda num dado intervalo de tempo na 3ª campanha e descrita no capítulo 3. O valor assumido foi de 0.54. Na fórmula de Kamphuis, o d_{50} utilizado está de acordo com a análise granulométrica feita no Capítulo 2, referente ao ponto P_0 da 3ª campanha, tendo um valor de 0.89 mm. O declive de 3% empregue na fórmula baseia-se nos levantamentos batimétricos efetuados no dia da 3ª campanha para zonas abaixo do nível do mar. O coeficiente empírico utilizado foi de 0.15, obtido com base na expressão 6.4.

Especificados os parâmetros usados nas duas expressões, os resultados de cada onda característica para um período correspondente a um ano, são apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5.

Tabela 6.4 – Estimativa do transporte sólido longitudinal, através da fórmula de CERC.

Onda	$Q_s (\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$	$Q_s (\text{m}^3/\text{ano})$	Ocorrências	$Q_s (\text{m}^3/\text{ano})$
1	11.3	357756	2.80%	10007
2	3.7	115807	11.19%	12957
3	24.4	769535	9.09%	69958
4	10.1	319965	76.92%	246127
			Total	339000

Tabela 6.5 – Estimativa do transporte sólido longitudinal, através da fórmula de Kamphuis.

Onda	$Q_s (\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$	$Q_s (\text{m}^3/\text{ano})$	Ocorrências	$Q_s (\text{m}^3/\text{ano})$
1	11.6	364855	2.80%	10206
2	4.1	129063	11.19%	14441
3	29.0	914258	9.09%	83114
4	14.5	457512	76.92%	351933
			Total	460000

Os caudais apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5 indicam que a onda 4, com uma altura na rebentação de 1.36 metros e um ângulo com a perpendicular à linha de costa de 3.3° (Figuras 4.5 e 4.6), é aquela que contribui de forma mais significativa para a estimativa final. No que respeita ao caudal correspondente a cada onda, verifica-se que a onda 3, com uma altura na rebentação de 1.13 metros e um ângulo de 12.9° (Figuras 4.5 e 4.6), apresenta um resultado superior às restantes ondas, pois esta identifica-se como sendo a que tem maior obliquidade em relação à costa, facto que provoca um maior transporte longitudinal de Norte para Sul.

Perante os resultados finais obtidos, Kamphuis apresenta um caudal superior ao dado pela fórmula de CERC, embora os resultados de ambas as formulações assumam a mesma ordem de grandeza. As estimativas resultantes das duas expressões podem ser mais próximas, uma vez que k_b e m são parâmetros medidos em campo, associados a alguma

incerteza, e de forma análoga, o K, como coeficiente de calibração, pode ser modificado, aproximando os resultados.

6.5. Volumes sedimentares em transporte na costa Noroeste de Portugal

A estimativa do transporte sedimentar, e a comparação crítica do valor obtido, deve ser uma via de comprovação e validação das soluções que visam quantificar este tipo de transporte. No âmbito de um projeto de restabelecimento do transporte de areias da embocadura da ria de Aveiro, Oliveira (1968) apresentou um estudo dos volumes de areias litorais movimentadas em ano médio. Entre outras soluções, Oliveira (1968) apresentou uma estimativa anual para o transporte, recorrendo à fórmula de CERC, de $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ a $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$, no sentido Norte – Sul. Mais recentemente, Oliveira (1997) indica uma capacidade de transporte superior, cerca de $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Diogo (2004) diz que Teixeira em 1997 situou o valor entre $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Andrade e Freitas (2002) referem a costa Oeste de Portugal como sendo uma das mais ativas da Europa, estimando um volume de transporte sedimentar médio na direção Norte – Sul, de 1 a 2 milhões m^3/ano . O projeto Adaptaria (2013), também estima o transporte longitudinal, com base no modelo numérico utilizado nesta dissertação, GENESIS. O principal objetivo deste projeto foi a avaliação da posição da linha de costa, sendo os aspetos de calibração do modelo numérico diferentes dos utilizados nesta dissertação. Tendo por base a agitação característica entre 1971 e 2000 e o nível atual da superfície do mar, os autores estimaram que o troço compreendido entre o Poço da Cruz e a Praia de Mira apresenta um transporte sedimentar médio de $22.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{ano}$, no sentido Norte – Sul.

Em forma de síntese, na Tabela 6.6 são apresentados os valores do caudal sólido longitudinal, obtidos durante a elaboração desta dissertação.

Tabela 6.6 – Caudal sólido longitudinal

Método	Caudal sólido ($\times 10^4$)
Campo (Cenário A)	4.96 m ³ /ano/m
Campo (Cenário B)	0.96 m ³ /ano/m
GENESIS	24.0 m ³ /ano
CERC	33.9 m ³ /ano
Kamphuis	46.0 m ³ /ano

Os valores obtidos com recurso ao modelo numérico (GENESIS) e às fórmulas empíricas (CERC e Kamphuis), para o clima de agitação registado na 3ª campanha, são inferiores aos volumes normalmente apontados para o Noroeste de Portugal, referidos por Oliveira (1968), Oliveira (1997), Diogo (2004) e Andrade e Freitas (2002). Porém, a estimativa de 22.7×10^4 m³/ano do projeto Adaptaria (2013), vai de encontro ao resultado obtido, nesta dissertação, com o mesmo modelo.

Nos modelos numéricos e fórmulas empíricas, a distribuição transversal do transporte longitudinal é assumida como sendo uniforme até à zona de rebentação. Aplicando esta simplificação aos caudais obtidos em campo, tendo em atenção que estes quantificam somente o transporte sólido em suspensão e tendo como referencia os valores de Andrade e Freitas (2002), estabelece-se, para o cenário B, uma largura ativa do perfil entre 100 a 200 metros. Para o cenário A, a largura do perfil, face a uma distribuição uniforme dos volumes, apresenta-se pouco realista, embora a presença dos sensores durante a maior parte do tempo na zona de rebentação, podia ter inflacionado os valores do transporte sólido longitudinal (secção 6.2.2).

Capítulo 7

Considerações finais

Capítulo 7 Considerações finais

7.1. Conclusões

Nesta secção pretende-se resumir e realçar alguns aspetos relevantes no desenvolvimento dos capítulos que compõem esta dissertação. Após o capítulo inicial, onde é feita uma breve introdução, bem como a estruturação do corpo da tese, foram descritos 5 capítulos. Estes capítulos são o alvo de análise nesta secção.

No capítulo 2 foi apresentado o caso de estudo, onde são descritos todos os procedimentos e objetivos que levaram à realização das campanhas de campo na Praia de Mira, tendo-se procedido à caracterização da Praia de Mira, uma planície costeira aplanada e de baixa altitude, onde o pendor médio é relativamente pequeno.

No 3º capítulo foram apresentados os resultados obtidos nas campanhas de campo. Os valores da altura de onda significativa registados na costa, foram sempre inferiores aos registos do ondógrafo de Leixões, na 1ª e 2ª campanhas. Na 3ª campanha a altura de onda significativa registada pelos sensores equiparou-se aos registos de Leixões, havendo um período, durante a preia-mar, em que os valores registados na costa superaram os registos do ondógrafo. Conclui-se que os sensores, nas campanhas 1 e 2, estiveram na zona de rebentação, observando-se um aumento da altura de onda significativa à medida que se registavam maiores alturas da coluna de água. Na 3ª campanha, durante a preia-mar, o sensor localizou-se antes da zona de rebentação, permitindo estimar a relação entre a altura da coluna de água e a altura de onda significativa na zona de rebentação. O valor obtido para esta relação foi de 0.54.

No capítulo 4 utilizaram-se os modelos numéricos STWAVE e GENESIS, de forma a simular a propagação da ondulação desde o largo até à zona de rebentação. Dos resultados das simulações verifica-se que a altura de onda significativa não sofre grandes variações, especialmente até atingir a profundidade de fecho. O fenómeno de empolamento é o que assume maior importância desde a profundidade de fecho até à zona de rebentação, sendo que os valores da altura de onda são sempre maiores na rebentação que ao largo, exceto no caso da onda 3, cujo valor de H_{s0} foi de 1.19 metros, chegando à costa com uma altura significativa de 1.13 metros (Figura 4.5).

A refração é mais evidente na propagação da onda do largo até à profundidade de fecho, onde as alturas de onda são sempre inferiores às iniciais. O fenómeno da refração provoca uma rotação das ondas à medida que estas se aproximam da costa, sendo mais evidente para ondas que partem de NW, como foi o caso das ondas 3 e 2, sendo que a última apresentou um valor de H_{s0} igual a 0.93 metros e um H_b de 1.06 metros. Este fenómeno leva à perda de altura, podendo ser a causa da altura de onda na rebentação para a onda 3 ser inferior à registada ao largo. O fenómeno da refração não foi tão evidente na onda 2, que apresentou uma altura ao largo mais pequena, em relação à onda 3, sendo o fenómeno de refração mais evidente em ondas com maiores alturas.

Os valores da altura de onda significativa antes da zona de rebentação na 3ª campanha, são similares aos registos de Leixões. Esta situação foi comprovada através das simulações numéricas, onde as ondas não sofrem grandes variações de altura até atingirem a zona da rebentação. Estas conclusões referem-se ao trecho em estudo, considerando o clima de agitação pouco energético registado durante esta campanha.

No capítulo 6, foram utilizadas as fórmulas de CERC e Kamphuis, assim como o modelo numérico, GENESIS permitindo uma estimativa do volume de sedimentos que atravessa uma secção transversal em determinada unidade de tempo. A estimativa conseguida através da aplicação da fórmula de Kamphuis (46.0 m³/ano) é superior às obtidas com recurso à fórmula de CERC e ao modelo numérico, 33.9 m³/ano e 24.0 m³/ano, respetivamente.

Numa segunda fase do capítulo 6, foi feita uma estimativa do transporte sólido longitudinal com base nos valores da velocidade e concentração de sedimentos em suspensão apresentados no capítulo 5. A estimativa corresponde ao transporte sólido em suspensão por metro de largura, extrapolado para o período de um ano. A parcela que o valor obtido representa no transporte sedimentar total do perfil ativo torna-se difícil de quantificar. Assumir que a distribuição do transporte longitudinal é uniforme bastaria para eliminar o resultado obtido no cenário A (Tabela 6.2), tendo em consideração os valores da bibliografia referida anteriormente. Por outro lado, uma vez que os sensores de medição estiveram na zona de rebentação, o tipo de rebentação mergulhante observada no local, justifica, em parte, as quantidades registadas. Outro aspeto a assinalar, é que o declive, pouco acentuado, da praia onde foram realizados os estudos, leva a crer, que o tipo de

rebentação progressiva, seja o mais frequente no local. Segundo Wang *et al.* (2002), a distribuição transversal no caso das ondas progressivas é aproximadamente linear. Esta ideia vai ao encontro dos resultados obtidos pelo modelo numérico e pelas fórmulas empíricas, que assumem esta aproximação, justificando-se os valores, inferiores ao normalmente estimado para o litoral NW, como sendo resultado de um clima de agitação pouco energético.

7.2. Trabalhos futuros

A dificuldade aliada às incertezas no tratamento das questões costeiras, nomeadamente às transformações sofridas pela ondulação desde o largo até à zona de rebentação e à quantificação do transporte sólido que ocorre devido à influência das ondas, requer a validação e calibração de formulações e modelos numéricos que traduzam o mais aproximadamente possível as dinâmicas costeiras.

A realização regular de campanhas de campo, que permitiriam caracterizar periodicamente o clima de agitação e a as quantidades de sedimentos movidas sob efeito das ondas, será fundamental para a criação de uma base de dados extensa, permitindo a comparação crítica dos valores obtidos através da modelação numérica.

Nas campanhas de campo realizadas, foram colocados 3 sensores OBS, para os quais foram estabelecidas alturas de influência. A altura de influência do OBS_{3,1} (localizado a maior altura em relação à areia), que variou consoante a profundidade (h_c), influenciou de forma significativa os valores obtidos para os caudais sólidos em suspensão. Embora a concentração de sedimentos em suspensão na parte superior da coluna de água, à medida que a profundidade aumenta seja mais próxima de zero do que da concentração medida no OBS_{3,1}. A colocação de sensores ao longo da coluna de água, com alturas de influência menores, seria uma forma de registar os valores reais das concentrações.

Como foi referido no corpo desta dissertação, o declive das praias está ligado a diferentes formas de rebentação, influenciando a distribuição transversal do transporte. O modelo numérico usado nas simulações considera uma distribuição do transporte longitudinal constante em largura, que deve ser reavaliada de forma a perceber o contributo de cada zona do perfil no transporte total, facilitando a interpretação dos resultados obtidos em campo. Uma sugestão, é a colocação de vários sensores (ECM e OBS) ao longo do perfil

transversal da praia, de modo a perceber a distribuição do transporte sedimentar ao longo da largura ativa do perfil.

A quantificação do transporte que se dá junto ao fundo seria igualmente um contributo para uma estimativa mais realista do volume de sedimentos em transporte.

A estimativa do transporte sólido transversal, abordada nesta dissertação, de forma simplificada, resulta das medições de campo. Este tipo de transporte é mais evidente em situações de temporal, movendo grandes quantidades de areia da praia. O modelo numérico utilizado contabiliza somente a componente longitudinal do transporte sólido. Seria importante, avaliar o comportamento dos perfis transversais, aprofundando a investigação sobre a forma dos perfis transversais quando evoluem no tempo em situação de défice ou ganho sedimentar.

Em conclusão esta dissertação aborda inúmeros temas que merecem ser alvo de uma investigação cuidada, e feita de forma crítica com o objetivo de recriar, da maneira mais realista possível, as dinâmicas costeiras.

Referências bibliográficas

Bibliografia

Adaptaria (2013). Relatório Adaptaria:

<http://climetna.fis.ua.pt/legacy/adaptaria>, (última consulta em Dezembro de 2013).

Alberti, A. (2010). “Variabilidade das Correntes Costeiras da Plataforma Inteira Rasa, no Balneário de Shangrilá – PR”; Dissertação Apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos para Obtenção do Título de Mestre em Ciências, 94p.

Andrade, C., Freitas, M. (2002) “Climate Change in Portugal – Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAMProject”; Chapter 6: Coastal Zones, Editors Santos, F.D, Forbes, K. e Moita, D., Gradiva, Lisbon, 456p.

APRH (2007), Associação Portuguesa de recursos Hidráulicos, Jornal de Gestão Costeira Integrada, Glossário das Zonas Costeiras, Cardozo, A. (editor), “Fetch”.

<http://www.aprh.pt/rgci/glossario/fetch.html>, (última consulta a 08/11/2012).

Araújo, R., Alfredini, P. (2001). “O Cálculo do Transporte de Sedimentos Litorâneo: Estudos de Caso das Praias de Suarão e Cibratel (Município de Itanhaém, São Paulo) ”; Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 6 nº2, 28p.

ARH (2012), Administração da Região Hidrográfica do Centro I.P., Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território, Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos Rios Vouga, Mondego e Lis Integrados na Região Hidrográfica 4, Parte 2 – Caracterização Geral e Diagnóstico, 1.3 – Geológica e Geomorfologia, 35p.

Baptista, P., Cunha, T., Matias, A., Gama, C., Bernardes, C., Ferreira, Ó. (2011) “New Land – based Method for Surveying Sandy Shores and Extracting DEMs: the INSHORE System”, Environmental Monitoring and Assessment, 182 (1) (2011), pp.234-257.

Bayram, A., Larson, M., Miller, H., Kraus, N. (2001). “Cross-shore Distribution of Longshore Sediment Transport: Comparison Between Predictive Formulas and Field Measurements”; *an International Journal for Coastal, Harbour and Offshore Engineers, Coastal Engineering* 44, pp 79-99.

Beach, R., Stenberg, R. (1996). “Suspended – Sediment Transport in the Surf Zone: Response to Breaking Waves”; *Continental Shelf Research, Elsevier Science Publishers*, vol. 16, pp.1989-2003.

Birkemeier, W. (1985). “Field Data on Seaward Limit of Profile Change”; *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, Vol. 111(3), pp.598-602.

Bodge, K., Kraus, N. (1991). “Critical Examination of Longshore Transport Rate Magnitude”; *Proceedings of Conference on Coastal Sediments*, 91, ASCE, pp.139-155.

Brighett, G., Martins, J. (2001). “Estabilização e Proteção de Margens”; *Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária*, 77p.

Carvalho, J., Barceló, J. (1966). “Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal Metropolitano – Contribuição para o Seu Estudo”; *Memória nº290, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa*, 34p. Citado em **Coelho** (2005).

Coelho, C. (2005). “Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira”; *Dissertação para Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil*, 404p.

Dalrymple, R., Kirby, J. (1991). *RED/DIF 1 Version 2.3 Documentation Manual, Combined Refraction/Diffraction Model, CACR Report nº 91-2, University of Delaware*, January, 1991. Citado em **Zózimo et al.** (2005).

Davis, R. (1985). “Beach and Nearshore Zone”; *Costal Sedimentary Environments*. 2. Ed. New York: Springer-Verlag, pp.379-532. Citado em **Passos** (2010).

Dean, R., Dalrymple, R. (1991). “Water Wave Mechanics For Engineers And Scientist”; Volume 2, Chapter 4: Engineering Wave Properties, pp.78-130.

Dean, R., Dalrymple, R. (2002). “Coastal Processes with Engineering Applications”; Published by the Press Syndicate of the University of Cambridge, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom, Chapter 5, Waves and Wave-Induced Hydrodynamics, pp.88-123.

Demirbilek, Z., Vicent, C. (2002). “Water Wave Mechanics”; Coastal Engineering Manual, Part II, Regular Waves, Chapter 1, II-1-2, EM 1110-2-1100, Morgan, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 121p.

Dias, J., Ferreira, Ó., Pereira, A. (1994). “Estudo Sintético de Diagnósticos da Geomorfologia e da Dinâmica Sedimentar do Troços Costeiros entre Espinho e Nazaré”; Relatório Final. Instituto da Conservação da Natureza, relatório não publicado, 137p.

Dimar (Ed.). (2008). “Gestión de Datos e Información Oceanográfica Colombiana”; Centro Control Contaminación del Pacífico, Serie de Publicaciones Especiales Vol. 6, San Andrés de Tumaco, 140p.

Diogo, M. (2004). “Evolução da Linha de Costa da Praia da Vagueira”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 188p.

Downinig, J. (2006). “Twenty-five Years with OBS Sensors: The Good, the Bad, and the Ugly”; D&A Instrument Company, 24 Seton Road, Port Townsend, Washington, 98368, USA, Continental Shelf Research n° 26, Elsevier Science Publishers, pp.2299-2318.

Erikson, L., Hanes, D., Barnard, P., Gibbs, A. (2005). “Swash Zone Characteristics at Ocean Beach, San Francisco, CA”; 13p.

http://walrus.wr.usgs.gov/reports/reprints/Eriksonetal_ICCE06.pdf, (última consulta em novembro de 2012).

Fenton, J. (1990). “Nonlinear Wave Theories”; The Sea, Volume 9: Ocean Engineering Science, Eds. B. Le Méhauté and D. M. Hanes, Wiley, New York, 18p.

Ferreira, Ó. (1993). “Caracterização dos Principais Fatores Condicionantes do Balanço Sedimentar e da Evolução da Linha de Costa entre Aveiro e o Cabo Mondego”; Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, 166p.

Fonseca, J. (2011). “A Dimensão dos Sedimentos na Caracterização das Praias”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 187p.

Fortes, C. (2002). “Transformações Não-lineares de Ondas Marítimas em Zonas Portuárias”; Análise pelo Método dos Elementos Finitos, Tese de Doutoramento em Eng. Mecânica, IST/DEM. Citado em **Zózimo et al.** (2005).

Gravens, M., Kraus, N., Hanson, H. (1991). “GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change”; Report 2, Workbook and System User’s Manual, US Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314 – 1000, 431p.

Hallermeier, R. (1978). “Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion”; Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, Hamburg, Germany, pp.1493-1512.

Hansen, J. (1990). “Periodic Waves in the Surf Zone: Analysis of Experimental data”; Coastal Engineering, Vol. 14, pp.14-41.

Holmes, P. (2001). “Coastal Processes: Waves”; Professional Development Programme: Coastal Infrastructure Design, Construction and Maintenance, A Course in Coastal Defense Systems I, Chapter 5, The University of the West Indies, St. Lucia, Organization of American States, 23p.

IH (2012), Instituto Hidrográfico:

<http://www.hidrografico.pt/previsao-mares.php>, (última consulta a 15/10/2012).

IM (2008), Instruction Manual:

OBS-3+ and OBS300 Suspended Solids and Turbidity Monitors, Copyright © 2008-2013, Campbell Scientific, Inc., 36p.

Imamura, F. (2005). “Mechanism of Tsunami Generation, Propagation and Runup - Sharing Experiences with Japanese”; DCRC, Tohoku Univ., 34p.

http://www.soi.wide.ad.jp/class/20050040/materials_for_student/01/050511SOI.pdf,

(última consulta em Dezembro de 2012).

Inc., I.-S. (2010):

<http://www.in-situ.com/products/Water-Level/Level-TROLL-Family/Level-TROLL-500-Instrument/specs>, (última consulta a 17/11/2010). Citado em **Lourenço** (2012).

Kaczowski, H., Kana, T. (2012). “Final Design of the Nags Head Beach Nourishment Project Using a Longshore Numerical Model”; Coastal Science & Engineering, Inc. PO Box 8056, 160 Gills Creek Parkway, Columbia, South Carolina, 29202 USA, 15p.

Kamphuis, J. (1991). “Alongshore Sediment Transport Rate”; Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 117(6), pp.624-641. Citado em **Wang, et al.** (2002).

Kamphuis, J., Davis, M., Nairn, R., Sayo, O. (1986). “Calculation of Littoral Sand Transport Rate”; Coastal Engineering, n. 10, pp.1-21. Citado por **Coelho** (2005).

King, D., Galvin, C. (2002). “Coastal Sediment Properties”; Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-1, Engineer Manual 1110-2-1100, Walton, T. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 41p.

Komar, P. (1976). “Beach Processes and Sedimentation”; Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 429p.

Lourenço, A. (2012). “Estudo do Transporte Sedimentar por Efeito da Ondulação”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 50p.

Masselink, G., Puleo, J. (2006). “Swash-zone Morphodynamics”; Continental Shelf Research, n° 26, Elsevier Science Publishers, pp.661-680.

Mil – Homens, J., Ranasinghe, R., Van Thiel de Vries, J., Stive, M. (2013). “Re-evaluation and Improvement of Three Commonly Used Bilk Longshore Sediment Transport Formulas”; Coastal Engineering 75, Elsevier Science Publishers, pp.29-39.

O’Brien, M., Isaacs, J., Johnson, J. (1948). “Graphical construction wave refraction diagrams”; H. O. Pub. No. 605, United States Navy Department Hydrographic Office, 45p.

Oliveira, A., Santos, A., Ribeiro, M., Pólvara, C. (2012). “Aplicação do LISST em Praias Estuarinas. Exemplo da Praia do Alfeite”; Lisboa, 2^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, pp.307-310.

Oliveira, I. (1968). “Estudos do Restabelecimento Artificial do Transporte Litoral Através da Embocadura da Ria de Aveiro”; Hidrotécnica Portuguesa (versão reduzida do original para efeitos do concurso a Professor Catedrático do candidato I.B. Mota Oliveira), 138p.

Oliveira, I. (1997). “Proteger ou Não Proteger ou Sobre a Viabilidade de Diferentes Opções Face à Erosão da Costa Oeste Portuguesa”; Coletânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal, Associação Eurocoast – Portugal, pp.205-207.

Passos, R. (2010). “Modelagem Morfodinâmica do Transporte de Sedimento de Fundo em Ambientes Costeiros”; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, 106p.

Pereira, A. (2008). “Modelação da Agitação Marítima em Zonas Costeiras”; Dissertação para Obtenção de Grau de Mestre em Engenharia e Arquitetura Naval, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 80p.

Pereira, C. (2012). “Manual de Utilização do Modelo Numérico CEDAS”; Módulo Beach, 122p, (não editado).

Puelo, J., Johnson, R., Butt, T., Kooney, T., Holland, K. (2006). “The Effect of Air Bubbles on Optical Backscatter Sensors”; *International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics* 230, Elsevier Science Publishers, pp.87-97

Puleo, J., Beach, R., Holman, R., Allen, J. (2000). “Swash Zone Sediment Suspension and Transport and the Importance of Bore – Generated Turbulence”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, NO. C7, pp.21-44.

Rosati, J., Walton, T., Bodge, K. (2002a). “Longshore Sediment Transport”; *Coastal Engineering Manual, Part III, Longshore Sediment Transport Processes, Chapter 2*, Engineer Manual 1110-2-1100, Morang, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 113p.

Rosati, J., Walton, T., Bodge, K. (2002b). “Longshore Sediment Transport”; *Coastal Engineering Manual, Part III, Costal Sediment Processes, Chapter 2*, Engineer Manual 1110-2-1100, Morang, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 113p.

Sancho, F. (2002). “Transformação de Ondas”; *Apontamentos de Engenharia Costeira e Portuária*, 33p, (não editado).

Santos, D., Abreu, T., Silva, P., Sancho, F. (2012). “Empolamento, Rebentação e Dissipação das Ondas Junto à Costa”; 2^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, 20, 21 e 22 de Junho, pp.159-163.

Schoonees, J., Theron, A. (1993). “Review of the Field Data Base for Longshore Sediment Transport”; *Coastal Engineering*, nº 19, pp.1-25.

Schoonees, J., Theron, A. (1996). “Improvement of the Most Accurate Longshore Transport Formula”; 25 Intern. Conf. On Coastal – Eng. ASCE, V. 4, pp.3652-3665. Citado em **Araújo e Alfredini** (2001).

Sena, M. (2010). “Modelação da Evolução da Linha de Costa – Influência do Uso de Séries Sintéticas de Agitação”; Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 140p.

Short, A. (1999). “Wave – Dominated Beaches”; Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics, Edited by Andrew D. Short, University of Sydney, Australia.

Silveira F., Varriale, M. (2005). “Propagação das Ondas Marítimas e Tsunamis”; Caderno Brasileiro de Ensino de Física, V. 22, N. 2, pp.190-215.

Soulsby, R. (1997). “Dynamic of Marine Sands”; Thomas Telford Publications, 249p.

Sousa, G. (2009). “Avaliação da Concentração de Sedimentos na Zona de Rebentação”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 66p.

Stewart, R. (2008). “Introduction to Physical Oceanography”; Department of Oceanography Texas A & M University, 345p.

Sutherland, T., Lane, P., Amos, C., Downing, J. (1999). “The Calibration of Optical Backscatter Sensors for Suspended Sediment of Varying Darkness Levels”; International Journal of Marine Geology Geochemistry and Geophysics, Marine Geology 162 (2000), pp.587-597.

Sutherland, T., Lane, P., Amos, C., Downing, J. (2000) “The Calibration of Optical Backscatter Sensors for Suspended Sediment of Varying Darkness Levels”; International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics 162, Elsevier Science Publishers, pp.587-597

Svendsen, A. (1987). “Analysis of Surfzone Turbulence”; Journal of Geophysical Research, Vol. 92, pp.5115-5124.

Svendsen, A. (2006). “Introduction to Nearshore Hydrodynamics”; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 24, World Scientific.

Teixeira, A. (2006). “Evolução da linha Litoral a Sul do Porto da Engenharia da Foz – Estudos em Modelo Matemático, Lisboa, CEHIDRO (Instituto Superior Técnico).

Thurman, H. (1997). “Introductory Oceanography”; Prentice Hall, New Jersey, 544p.

Valle, R., Medina, R., Losada M. (1993). “Dependence of Coefficient K on Grain Size”; Technical Note nº 3062, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 119 (5), pp.568-574.

Veeramondy, J., Svendsen, I. (2000). “The Flow in Surf Zone Waves”; Coastal Engineering 39, Elsevier Science Publishers, pp.93-122.

Veloso-Gomes, F. (1981). “Espraçamento de Ondas Regulares sobre Taludes de Obras, Marítimas”; Dissertação para Doutoramento em Hidráulica Aplicada, Laboratório de Hidráulica, Feup.

Wang, P., Ebersole, B., Smith, E. (2002). “Longshore Sand Transport – Initial Results from Large-Scale Sediment Transport Facility”; ERDC/CHL CHETN-II-46, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Wilson, T. (2007). “How Surfing Works – Breaking Waves”, 10p.

<http://adventure.howstuffworks.com/outdoor-activities/water-sports/surfing6.htm>, (última consulta em Dezembro de 2012).

Zózimo, A., Gonçalves, A., Fortes, C., Charneca, N. (2005). “Ferramentas SIG para Modelos de Propagação de Ondas – Desenvolvimentos Preliminares”; Comunicação Apresentada ao 7º SILUSBA, Maio 30 – Junho 2, 2005, Évora Organizado pela APRH, 15p.